

**29 de Agosto del 2016**



# **Universidad de Buenos Aires**

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos

Tesis de Licenciatura en Oceanografía

**Caracterización de la profundidad de la capa de mezcla en la Plataforma Argentina**

**Tesista: Valentina Giunta**

**Directora: Dr. Silvia Inés Romero**

**Co-directora: Lic. Lucía Carolina Kahl**

**-2016-**

# Resumen

La profundidad de la capa de mezcla (PCM) delimita una región superficial de la columna de agua donde el intercambio entre el océano y la atmósfera generan sobre la superficie turbulencia que ocasiona una homogeneidad en la región y, por ende, en las variables físicas como la temperatura, la salinidad y la densidad. Su variabilidad tiene implicancias en la dinámica del fitoplancton y en la interacción mar-atmósfera asociado a flujos de calor, masa y gases. La definición de PCM puede estar basada en diferentes parámetros físicos (principalmente en temperatura y densidad potencial) y, además, representar diferentes escalas temporales (días, meses, estaciones). En este trabajo de tesis se pretende encontrar un único criterio que permita estimar la PCM en la Plataforma Argentina y a partir del mismo caracterizar su variabilidad estacional y espacial. Se establece una metodología que utiliza datos CTD de alta resolución vertical para aplicar los diferentes criterios existentes en la bibliografía y evaluar su eficacia al comparar con valores de PCM estimados visualmente. En primer lugar, se define un criterio que utiliza la densidad potencial para identificar aquellos perfiles completamente mezclados de los estratificados. Luego, se define un criterio único calibrado y validado con datos independientes, que permite estimar la PCM para toda el área de estudio y época del año ( $\Delta\sigma_\theta = 0,07\text{kg/m}^3$  con una  $Z_{ref} = 10\text{m}$ ). Utilizando un set de datos históricos se aplica el criterio único para obtener mapas estacionales de la PCM. Los resultados muestran capas de mezcla más profundas en plataforma media y sur durante el invierno, y menos profundas a medida que avanza el período de calentamiento. Durante el verano el 31.6 % de los perfiles resultan no homogéneos y se caracterizan por tener una PCM arealmente cuasi-constante con un valor promedio de 30 m, mientras que para el resto del año se destaca una diferencia en la estructura vertical de la columna de agua entre la región norte y sur del área de estudio (aproximadamente en 47°S). Se evalúo la relación entre la temperatura superficial del mar (TSM) vs. PCM y no se evidenció un patrón característico entre ambas variables. Con el fin de aportar conocimiento sobre la relación PCM vs. dinámica del fitoplancton, se testeó la relación entre la PCM y los máximos sub-superficiales de fluorescencia (MSSF) de primavera y verano. Los resultados obtenidos no muestran diferencias entre las campañas oceanográficas GEF 1 y GEF 3 (marzo y octubre) pero sí un alto porcentaje (relativo) de casos (mayor que el 60 %) en los cuales el MSSF yace cercano a la base de la capa de mezcla,

tanto por debajo de la misma como inmerso dentro de ella (entre -10 y 30 m).

# Agradecimientos

- A mis papás, este logro es tan mío como de ustedes. Gracias por su apoyo incondicional y por darme alas para soñar y lograr mis metas.
  - A mis hermanos Lucas y Carolina, juntos supimos hacer un hogar lejos de casa y acompañarnos en las risas y llantos. A Merlina, quien de pequeña supo llenar mi vida de alegría.
  - A mis abuelas, por tantas velas prendidas durante mis exámenes. A mis abuelos, por acompañarme a la distancia.
  - A Silvia y Carolina, por enseñarme que con esfuerzo y dedicación todo es posible. Me llevo muchas enseñanzas y consejos que me acompañarán siempre.
  - A mis amigas de la vida, a esas que supieron comprender mis ausencias durante noches de estudios. Gracias por acompañarme en cada etapa, juntas supimos empujarnos para llegar a la meta.
  - A Gaspar, por darme el último empujón en esta carrera. Gracias por enseñarme que en esta vida todo es más lindo y se hace más fácil si se hace de a dos.
  - A mis amigos de la facultad, compañeros incansables en el estudio. Gracias por largas jornadas de risas y compañerismo. Atesoro cada momento junto a ustedes.
  - A mis pipis y mis grandes heroínas, pilares fundamentales en toda esta etapa. Llenaron mi vida de luz y risas.
  - A mis amigas de la oficina, por hacer que ir al trabajo me llene de alegría.
  - A mis docentes y ayudantes, a todos ellos, por enseñarme mucho más que Oceanografía. Ojalá en algún futuro pueda llegar a motivar alumnos como lo hacen ustedes día a día.
  - Al grupo Dinámica Oceánica del SHN, por abrirme las puertas de su lugar de trabajo. Gracias por su apoyo durante todo este proceso.
  - Al jurado: Walter, Andrés y Diego, por tomarse el tiempo para leer esta tesis y por sus enseñanzas durante la carrera.
- Esta tesis fue realizada en el contexto del Proyecto PIDDEF 47/12 (Programa de Investigación y Desarrollo para la Defensa) financiado por el Ministerio de Defensa de Nación, a cargo de la Dra. Silvia I. Romero.**

# Índice general

<b>Listas de figuras</b>	<b>6</b>
<b>Listas de tablas</b>	<b>10</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>12</b>
1.1. Estructura vertical del océano-Capa de mezcla superficial . . . . .	13
1.1.1. Profundidad de la capa de mezcla (PCM) . . . . .	16
1.2. Área de estudio . . . . .	20
1.2.1. Antecedentes en el área de estudio . . . . .	23
<b>2. Conjunto de datos y metodología</b>	<b>26</b>
2.1. Datos . . . . .	26
2.1.1. Datos para obtener un criterio único de estimación . . . . .	26
2.1.2. Datos para caracterizar la PCM en la Plataforma Argentina . . . . .	27
2.1.3. Datos de Fluorescencia indicativos del Máximo Sub-superficial de Clorofila . . . . .	30
2.2. Metodología . . . . .	31
2.2.1. Metodología para obtener un criterio único . . . . .	31
2.2.2. Calibración y validación del criterio único para toda el área y época del año . . . . .	35
2.2.3. Metodología para obtener mapas estacionales de PCM . . . . .	36
2.2.4. Metodología para relacionar el máximo sub-superficial de fluorescencia y la PCM . . . . .	37
<b>3. Resultados y Discusión</b>	<b>38</b>
3.1. Criterio único . . . . .	38
3.1.1. Calibración y validación del criterio único para toda el área y época del año . . . . .	50
3.2. Mapas estacionales de PCM . . . . .	52
3.3. Relación entre la PCM y la profundidad del máximo sub-superficial de fluorescencia . . . . .	65
<b>4. Conclusiones</b>	<b>68</b>
<b>5. Apéndice</b>	<b>70</b>
5.1. Metodología . . . . .	70

5.1.1. Criterio desarrollado por Lorbacher et al. (2006) para estimar la PCM a escala global . . . . .	70
5.1.2. Relación entre la SST y la MLD . . . . .	71
<b>Bibliografía</b>	<b>79</b>

# Índice de figuras

1.1. Variabilidad temporal de la PCM (MLD) horaria y diaria. Ejemplo ilustrativo para una boyas de <i>Tropical Atmosphere Ocean</i> (TAO) fondeada a 0°S y 110°O. Fuente: <a href="http://faculty.washington.edu/kessler/pacs/110w-mtr/newmain.html">http://faculty.washington.edu/kessler/pacs/110w-mtr/newmain.html</a> ; noviembre, 2006.	13
1.2. Visión esquemática de la capa de mezcla oceánica. Aparecen las celdas Langmuir y el resto de los procesos que afectan esta zona. Fuente: <i>Jayne Doucette, Woods Hole Oceanographic Institute</i> ; <a href="https://wattsupwiththat.com">https://wattsupwiththat.com</a> , agosto, 2016.	14
1.3. Forzantes físicos que participan en la estratificación y en la mezcla. Los efectos que producen los forzantes físicos sobre la columna de agua definirán el grado de estratificación en la vertical.	15
1.4. Frente de mareas. $f$ frente; el punteado representa líneas de igual densidad. Extraído de Mann y Lazier, 2006 [38].	15
1.5. Ejemplo ilustrativo en donde se determina la PCM como la profundidad del máximo gradiente de densidad observado en distintos meses. Fuente: <a href="http://www.boya-agl.st.ieo.es/boya_agl/mixed.html">http://www.boya-agl.st.ieo.es/boya_agl/mixed.html</a> ; noviembre, 2016.	17
1.6. Capa de mezcla (PCM). Climatología estimada a través de perfiles individuales con un valor umbral para T de $\Delta T = 0,2^{\circ}\text{C}$ a $Z_{ref} = 10\text{m}$ . Los valores fueron determinados a través de una inspección visual de los perfiles y series de tiempo. [17]	19
1.7. Regiones frontales en el Atlántico Sudoccidental. Los diagramas dentro de las cajas representan la estructura vertical de los frentes. Las líneas negras muestran la superficie de densidad, las flechas muestran el flujo de agua, los círculos con una cruz dentro representan flujos entrantes a la hoja, los círculos con un punto dentro representan flujos salientes de la hoja. "T" o "S" hacen referencia a la variable principal que caracteriza el frente. En el mapa ubicado en la orilla inferior derecha se muestra las corrientes principales y la circulación general superficial para el Atlántico Sudoccidental. Extraído de Acha <i>et al.</i> (2004) [1].	21
1.8. Amplitud del ciclo estacional de la TSM. La amplitud del ciclo anual de la temperatura fue calculada a partir de la diferencia entre la máxima y la mínima TSM. La línea punteada indica la isobata de 200 m y la negra el Frente Subantártico estimado por A. Piola. Extraído de Martínez, 2005 [40].	23

<b>1.9. Relación entre la PCM y la SST.</b> Valores medios de PCM, promediados para cada estación del año, vs. su correspondiente SST para el Área 1 comprendida entre 35-40°S y 50-55°O (a) y para el Área 2, comprendida entre 35-40°S y 55-65°O (b) del Atlántico Sudoccidental. Extraído de Blanc et al., 1983 [8]	24
<b>2.1. Posición de las estaciones hidrográficas durante las campañas GEF.</b> En símbolos se muestran la posición de las estaciones CTD y en líneas de colores el recorrido del buque durante el cual se tomaron muestras a bordo. El número de cada estación se muestra en el mismo color que la campaña a la cual pertenece. El degradé de colores de fondo y los contornos indican la topografía en metros. Extraído de Charo y Piola (2014) [15]	27
<b>2.2. Posición de las estaciones hidrográficas del conjunto de datos descriptos en la Sección 2.1.2.</b> En círculos grises se muestra la posición de los datos muestreados <i>in situ</i>	29
<b>2.3. Perfiles verticales de fluorescencia (clorofila [59]) para las estaciones que presentan estratificación del conjunto de datos GEF 1 Sección 2.1.1.</b> Los perfiles verticales de fluorescencia se muestran en líneas azules.	30
<b>2.4. Perfiles verticales de fluorescencia (clorofila [59]) para las estaciones que presentan estratificación del conjunto de datos GEF 3 Sección 2.1.1.</b> Los perfiles verticales de fluorescencia se muestran en líneas azules.	30
<b>2.5. Método gráfico desarrollado por Lorbacher et al. (2006 [35]) para estimar la PCM a partir de perfiles verticales de (T, S y <math>\sigma_\theta</math>).</b> Se muestra un esquema ilustrativo de la metodología empleada para estimar la PCM usando un perfil vertical de temperatura de alta resolución. a) Se muestra el perfil vertical de temperatura (línea sólida negra), la PCM (o <i>hmix</i> ) en líneas punteadas negras y el nivel más cercano a la PCM (o $z_{mld}$ ) con un círculo negro. b) Se muestra la curvatura (línea sólida negra). c) Se muestra los dos parámetros usados como condiciones de borde (línea sólida negra y gris). Extraído de Lorbacher et al. 2006 [35]	34
<b>2.6. Posición de las estaciones hidrográficas seleccionadas de manera aleatoria del conjunto de datos descriptos en la Sección 2.1.2 para realizar la calibración (a) y la validación (b) del criterio único.</b> En la figura a (b) se muestra en círculos de color rosa la posición de los perfiles seleccionados para marzo (julio), en color celeste los de septiembre (enero) y en color verde los de octubre.	36
<b>3.1. Gráfico de los perfiles verticales de T, S y <math>\sigma_\theta</math> de las estaciones 59, 60 y 61 de octubre.</b> Se observa la columna homogénea en la estación 59 (prof.<200 m) vs. los perfiles no homogéneos con capa de mezcla de las estaciones profundas 60 y 61. Mapa extraído del Informe Técnico para GEF 1. [46]	39
<b>3.2. Posición de las estaciones hidrográficas durante las campañas GEF.</b> Se muestran identificadas en círculos de colores las estaciones que resultaron no presentar capa de mezcla (color rosa) y las que sí la tienen (color celeste) según el criterio que se definió en la Ecuación 2.2.	41

<b>3.3. Resultados obtenidos para los perfiles que cuentan con capa de mezcla de GEF 1.</b> Se muestran los histogramas porcentuales [%] resultantes para la diferencia entre la PCM obtenida con la estimación visual y la PCM obtenida con el Criterio 1, 2 y 9 respectivamente. En líneas punteadas se marca el intervalo correspondiente a una diferencia entre [-10, 10] metros y se encuentra indicado el porcentaje de perfiles que cuenta con una diferencia comprendida en el respectivo intervalo. . . . .	43
<b>3.4. Resultados obtenidos para los perfiles que cuentan con capa de mezcla de GEF 2.</b> Se muestran los histogramas porcentuales [%] resultantes para la diferencia entre la PCM obtenida con la estimación visual y la PCM obtenida con el Criterio 1, 2 y 9 respectivamente. En líneas punteadas se marca el intervalo correspondiente a una diferencia entre [-10, 10] metros y se encuentra indicado el porcentaje de perfiles que cuenta con una diferencia comprendida en el respectivo intervalo. . . . .	44
<b>3.5. Resultados obtenidos para los perfiles que cuentan con capa de mezcla de GEF 3.</b> Se muestran los histogramas porcentuales [%] resultantes para la diferencia entre la PCM obtenida con la estimación visual y la PCM obtenida con el Criterio 1, 2 y 9 respectivamente. En líneas punteadas se marca el intervalo correspondiente a una diferencia entre [-10, 10] metros y se encuentra indicado el porcentaje de perfiles que cuenta con una diferencia comprendida en el respectivo intervalo. . . . .	45
<b>3.6. Posibles valores de umbral para una <math>Z_{ref} = 2.5 \text{ m}</math></b> Se muestra el histograma porcentual que contiene los posibles valores de umbral para una $Z_{ref} = 2.5 \text{ m}$ según la Ecuación 2.4. En líneas punteadas azules se delimita el intervalo de valores con mayor frecuencia y se encuentra indicado el % total que representa. . . . .	47
<b>3.7. Posibles valores de umbral para una <math>Z_{ref} = 10m</math></b> Se muestra el histograma porcentual que contiene los posibles valores de umbral para una $Z_{ref} = 10m$ según la Ecuación 2.4. En líneas punteadas azules se delimita el intervalo de valores con mayor frecuencia y se encuentra indicado el % total que representa. . . . .	47
<b>3.8. Histogramas de la PCM para GEF 1 (a), GEF 2 (b), GEF 3 (c) y las tres campañas juntas (d).</b> En todos los casos se muestra la cantidad de datos (observaciones) utilizados, el valor medio y el desvío estándar de la variable. . . . .	52
<b>3.9. Posición de los perfiles verticales de la base de datos para invierno (a), primavera (b), verano (c) y otoño (d).</b> Se muestran identificadas en círculos de colores las estaciones que resultaron homogéneas (color rosa) y las que no (color celeste) según el criterio que se definió en la Ecuación 2.2. . . . .	55
<b>3.10. Valor estimado de la PCM (m) para invierno (a), primavera (b), verano (c) y otoño (d).</b> Se utilizaron sólo los perfiles que presentan capa de mezcla del set de datos históricos descriptos en la Sección 2.1.2. . . . .	57
<b>3.11. Valor interpolado de la PCM (m) para invierno (a), primavera (b), verano (c) y otoño (d).</b> Se utilizaron sólo los perfiles que presentan capa de mezcla del set de datos históricos descriptos en la Sección 2.1.2. En asteriscos negros se muestran los puntos que se utilizaron para interpolar los valores de PCM usando el método Kriging. . . . .	59

<b>3.12. Histogramas de la SST para verano (a), otoño (b), invierno (c) y primavera (d) correspondientes al área comprendida entre 35°S-40°S y 50°O-55°O.</b> En todos los casos se muestra la cantidad de datos (observaciones) utilizados, el valor medio y el desvío estándar de la variable. Extraído de Blanc et al. (1983 [8]).	60
<b>3.13. Histogramas de la PCM para verano (a), otoño (b), invierno (c) y primavera (d) correspondientes al área comprendida entre 35°S-40°S y 50°O-55°O.</b> En todos los casos se muestra la cantidad de datos (observaciones) utilizados, el valor medio y el desvío estándar de la variable. Extraído de Blanc et al. (1983 [8]).	60
<b>3.14. Mapa con la ubicación geográfica del Área 1 y 2.</b> El Área 1 se encuentra comprendida entre (35 – 40)°S y (50 – 60)°O (rectángulo rojo) y el Área 2 entre (42 – 48)°S y (60 – 68)°O (rectángulo azul).	61
<b>3.15. Histogramas de la SST para invierno (a), primavera (b), verano (c) y otoño (d) correspondientes al Área 1.</b> En todos los casos se muestra la cantidad de datos (observaciones) utilizados, el valor medio y el desvío estándar de la variable.	62
<b>3.16. Histogramas de la SST para invierno (a), primavera (b), verano (c) y otoño (d) correspondientes al Área 2.</b> En todos los casos se muestra la cantidad de datos (observaciones) utilizados, el valor medio y el desvío estándar de la variable.	63
<b>3.17. Histogramas de la PCM para invierno (a), primavera (b), verano (c) y otoño (d) correspondientes al Área 1.</b> En todos los casos se muestra la cantidad de datos (observaciones) utilizados, el valor medio y el desvío estándar de la variable.	64
<b>3.18. Histogramas de la PCM para invierno (a), primavera (b), verano (c) y otoño (d) correspondientes al Área 2.</b> En todos los casos se muestra la cantidad de datos (observaciones) utilizados, el valor medio y el desvío estándar de la variable.	65
<b>3.19. Histogramas de la diferencia entre la PCM y la profundidad del máximo sub-superficial de fluorescencia para GEF 1 (a), GEF 3 (b) ambas campañas juntas (c).</b> En todos los casos se muestra la cantidad de datos (observaciones) utilizados, el valor medio y el desvío estándar de la variable.	66
<b>5.1. Perfil de temperatura con resolución vertical alta (a-c) y baja (d-f) considerado como ejemplo para estimar la <math>h_{mix}</math>.</b> Los círculos con contornos negros muestran el nivel más próximo a $h_{mix}$ . En línea sólida gris se muestra la interpolación. Extraído de Lorbacher et al. (2006 [25]).	71
<b>5.2. Relación entre la SST [°C] y la PCM [m] para el Área 1.</b> Se indican la cantidad de observaciones con las que se cuenta para invierno (a), primavera (b), verano (c) y otoño (d).	72
<b>5.3. Relación entre la SST [°C] y la PCM [m] para el Área 2.</b> Se indican la cantidad de observaciones con las que se cuenta para invierno (a), primavera (b), verano (c) y otoño (d).	73

# Índice de tablas

<b>1.1. Ejemplos de valores límites o umbrales para estimar la PCM.</b> La PCM será la profundidad a la cual la Temperatura $T$ o la Densidad Potencial ( $\sigma_\theta$ ) cambian un cierto valor límite, ( $\Delta T$ ) o ( $\Delta\sigma_\theta$ ), relativo a un cierto valor de referencia $Z_{ref}$ . Extraído de Boyer Montégut et al. (2004). <a href="#">[17]</a>	17
<b>2.1. Criterios que utilizan los máximos gradientes.</b> Se muestran los dos criterios seleccionados que utilizan los máximos gradientes para estimar la PCM.	32
<b>2.2. Criterios que utilizan gradientes.</b> Se muestran los criterios seleccionados que utilizan los gradientes, valores de umbral y profundidades de referencia para estimar la PCM.	32
<b>2.3. Criterios que utilizan métodos gráficos.</b> Se muestran los criterios seleccionados que utilizan la curvatura del perfil para ubicar la posición de la PCM.	33
<b>3.1. Cantidad de perfiles.</b> Se muestran los valores totales y los restantes luego de aplicar el criterio para separar aquellos perfiles sin capa de mezcla de los que sí cuentan con ella.	40
<b>3.2. Regresiones lineales entre la PCM obtenida con los Criterios y la PCM obtenida con la estimación visual.</b> Se presentan en la tabla los valores del coeficiente de determinación ( $R^2$ ) para cada una de las regresiones. Los valores en negrita resultaron ser significativamente distintos de cero con un 99 % de confianza.	46
<b>3.3. Pruebas empleadas para encontrar un criterio que sea representativo de la región de estudio.</b> Se muestran los valores de umbral y profundidades de referencia que se utilizaron para estimar la PCM.	48
<b>3.4. Regresiones lineales entre la PCM obtenida con las pruebas descriptas en la Tabla 3.3 y la PCM obtenida con la estimación visual.</b> Se presentan en la tabla los valores del coeficiente de determinación ( $R^2$ ) para cada una de las regresiones. Los valores en negrita resultaron ser significativamente distintos de cero con un 99 % de confianza.	49

3.5. % de perfiles verticales de $\sigma_\theta$ que al estimar la PCM con los criterios provistos por la Tabla 3.3 difieren (en valor absoluto) <10 m respecto a la PCM estimada visualmente. Se tuvo en cuenta que la campaña GEF 1 contiene 40 perfiles con capa de mezcla, GEF 2 contiene 60 y GEF 3 contiene 22, de manera tal que tiene un total de 122 perfiles verticales de $\sigma_\theta$ con presencia de capa de mezcla. . . . .	50
3.6. Regresiones lineales entre la PCM obtenida con los criterios y la PCM obtenida con la estimación visual para las 30 estaciones seleccionadas de manera aleatoria de la base de datos descripta en la Sección 2.1.2 para los meses de marzo, septiembre y octubre. Se presentan en la tabla los valores del coeficiente de determinación ( $R^2$ ) para cada una de las regresiones. Los valores en negrita resultaron ser significativamente distintos de cero con un 99 % de confianza. . . . .	51
3.7. Regresiones lineales entre la PCM obtenida con la Prueba 7 y la PCMV para 15 estaciones seleccionadas de manera aleatoria de la base de datos descripta en la Sección 2.1.2 para los meses de enero, mayo y julio. Se presentan en la tabla los valores del coeficiente de determinación ( $R^2$ ) para cada una de las regresiones considerando cada mes por separado (5 datos para cada uno) y los tres meses juntos (15 datos en total). Los valores en negrita resultaron ser significativamente distintos de cero con un 99 % de confianza. . . . .	51
3.8. Cantidad de perfiles totales y parciales luego de aplicar diversos filtros sobre las bases de datos estacionales. En la primer columna se muestra la cantidad de perfiles totales de la base de datos para cada estación. En la segunda, se muestra la cantidad total y porcentual (respecto del total) resultante luego de aplicar un filtro que permite retener sólo aquellos perfiles que contengan 30 o más datos en los primeros 100 m. Por último, en la tercera columna se muestra la cantidad total y porcentual (respecto del total) de los perfiles que resultaron tener capa de mezcla luego de aplicar el filtro anterior. . . . .	53
3.9. Cantidad de perfiles verticales comprendidos en las Áreas 1 y 2. Se muestra la cantidad de mediciones en la columna de agua comprendidas en cada una de las regiones para las diferentes estaciones del año. . . . .	61

# Capítulo 1

## Introducción

Comparado con el océano profundo con quien interactúa, el medio ambiente costero (mares marginales o plataforma continental) es altamente variable en tiempo y espacio. Se encuentra bajo fuerte influencia de la topografía y, la estructura vertical de la columna de agua, está modulada y/o controlada por la competencia entre la estratificación, por calentamiento, y la mezcla debida al viento y a la marea<sup>1</sup>.

Bajo ciertas condiciones, cuando la tensión en la interfase (con la atmósfera o el fondo) es grande y la estratificación es débil, el océano se mezcla, de manera tal que todas sus propiedades tales como velocidad, temperatura, salinidad y densidad son prácticamente uniformes/constantes en la vertical hasta una cierta distancia desde la interfase (superficie o fondo). Estas capas se conocen como capas de mezcla superficial o de fondo (Talley, 2011 <sup>66</sup>). El espesor de la capa de mezcla superficial se denomina **Profundidad de la Capa de Mezcla (PCM)**.

La capa de mezcla superficial es muy importante ya que forma parte del sistema donde interactúan directamente el océano y la atmósfera, se encuentra dominada por la mezcla por viento y los intercambios de calor a través de la interfase. Las capas de mezcla pueden desarrollarse en diferentes escalas temporales o resultar de una combinación de ellas. A modo de ejemplo, la PCM estacional aumenta o disminuye a medida que avanzan las estaciones del año, mientras que la PCM diurna lo hace en un período de 24h (<sup>2</sup>) (Figura 1.1).

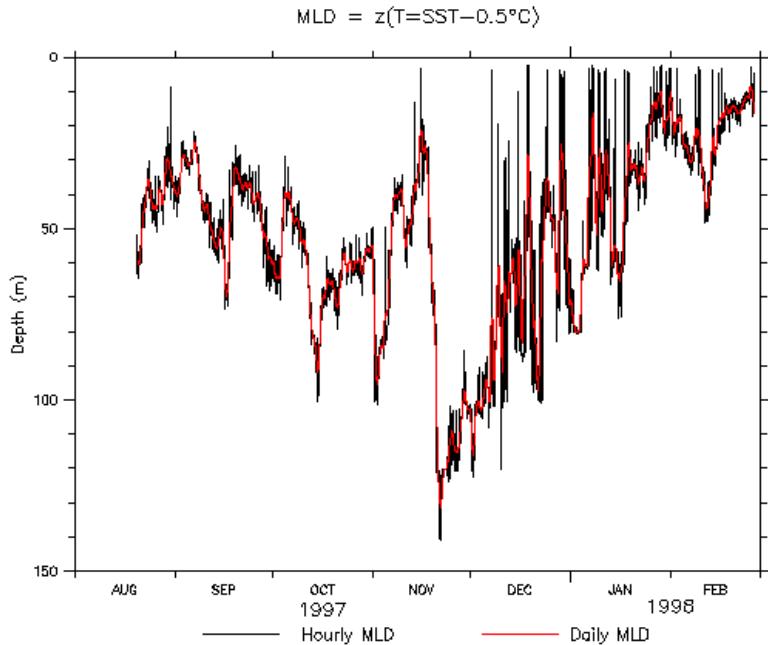
La formación de una capa superficial relativamente cálida en primavera y verano contribuye a que el fitoplancton, base de los ecosistemas marinos, se mantenga bajo condiciones adecuadas de luz; sin embargo, el crecimiento sostenido del fitoplancton requiere también un suministro continuo de nutrientes. Aquellas regiones con circulación vertical relativamente intensa que favorecen el flujo de nutrientes a través de la picnoclina a la zona iluminada, resultan más favorables y constituyen áreas altamente productivas (Romero et al., 2006 <sup>55</sup>). La importancia biológica y climática de la PCM motiva el interés en caracterizar su distribución y dinámica espacio temporal regional y cuantificar su variabilidad.

Bajo este marco conceptual, en el presente trabajo se pretende conocer la distribución espacio temporal y la variabilidad del espesor o profundidad de la capa de mezcla superficial que caracteriza a la Plataforma Continental Argentina. Empleando datos hidrográficos *in situ*, esta tesis evalúa varios criterios de estimación de PCM para escoger un único criterio que resulte válido para toda la región y toda época del año. El objetivo general es el de

<sup>1</sup><http://www.mt-oceanography.info/ShelfCoast/chapter01.html>; mayo, 2016

<sup>2</sup><http://www.oc.nps.edu/nom/main.html>; abril, 2003

brindar a la comunidad científica una caracterización de la PCM y su variabilidad para ser utilizada en distintas aplicaciones oceanográficas y ampliar el conocimiento sobre la relación entre la PCM y la dinámica del fitoplancton.



**Figura 1.1: Variabilidad temporal de la PCM (MLD) horaria y diaria.** Ejemplo ilustrativo para una boya de *Tropical Atmosphere Ocean* (TAO) fondeada a 0°S y 110°O. Fuente: <http://faculty.washington.edu/kessler/pacs/110w-mtr/newmain.html>; noviembre, 2006.

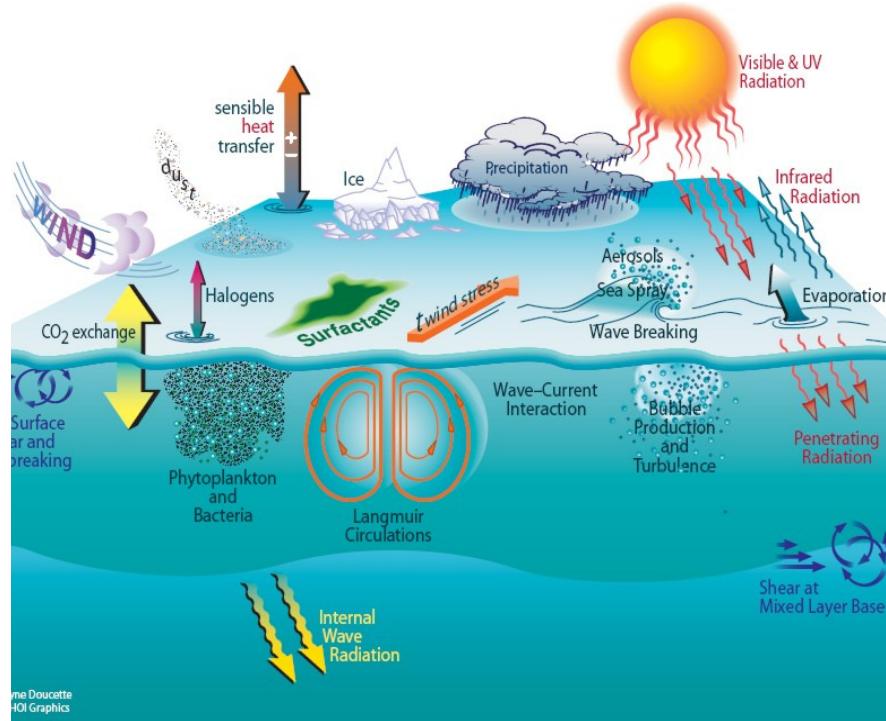
## 1.1. Estructura vertical del océano-Capa de mezcla superficial

En el océano, las estructuras horizontal y vertical de los parámetros físicos y biológicos son muy variables. En la vertical, las variaciones de temperatura (T) y salinidad (S) (y por lo tanto de densidad) definen una estructura organizada en capas características.

La capa de mezcla (CM) superficial del océano tiene un espesor que puede variar entre pocos metros hasta varias centenas y se encuentra expuesta a la interacción con procesos atmosféricos tales como viento, lluvia, turbulencia, calentamiento, entre otros (Figura 1.2). La CM contiene una delgada sub-capa (*skyn layer*) que se encuentra inmediata a los primeros milímetros de la superficie del océano. La *skyn layer* posee temperatura más baja que el resto de la CM, producto de la pérdida de calor con la atmósfera a través de la radiación de onda larga, y de los flujos de calor sensible y latente (Cronin, 2009<sup>[16]</sup>). Es el sitio más activo para los intercambios pues, se encuentra en contacto directo con la atmósfera. Su energía proviene, principalmente, de la mezcla por viento mediante la turbulencia vertical, del pasaje de ondas internas, del movimiento convectivo producto de las olas (celdas de Langmuir<sup>[3]</sup>) y

<sup>3</sup>Celdas inducidas por vientos constantes en mares calmados. Estos vientos provocan corrientes verticales que traen agua de algunos metros de profundidad.

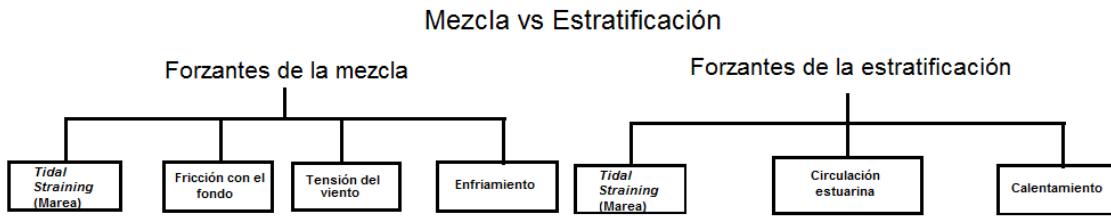
del ingreso de agua fría desde el tope de la CM.



**Figura 1.2: Visión esquemática de la capa de mezcla oceánica.** Aparecen las celdas Langmuir y el resto de los procesos que afectan esta zona. Fuente: Jayne Doucette, Woods Hole Oceanographic Institute; <https://wattsupwiththat.com>, agosto, 2016.

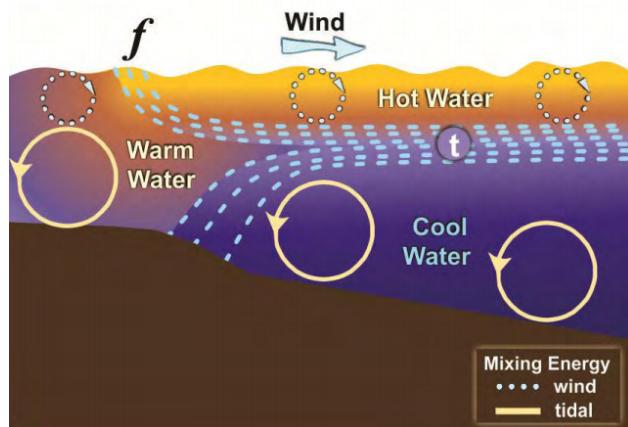
La región de transición entre la capa de mezcla y la capa profunda (ambas verticalmente homogéneas en T, S y densidad) es la de máximo cambio con la profundidad, o máximo gradiente, y se denomina termoclina, haloclina y picnoclina (para T, S y densidad, respectivamente); dichas regiones no siempre coinciden. Cuando la tasa de cambio entre las propiedades de las distintas capas es mayor, el grado de estratificación también lo es y, bajo estas condiciones, los procesos de mezcla no pueden romper la estratificación y “erosionar” la base de la capa de mezcla.

Cuando los flujos de flotabilidad disminuyen la PCM (por calentamiento o precipitación) y aumentan la estratificación, intensifican la picnoclina, y esta actúa como una barrera contra los procesos turbulentos y de mezcla. Por el contrario, cuando el gradiente de densidad disminuye, la picnoclina es fácilmente erosionable y la turbulencia (por viento) o la convección (por enfriamiento y evaporación) pueden profundizar la PCM o llegar a destruir completamente la estratificación. La sumatoria de los efectos de los distintos forzantes, resumidos en la Figura 1.3, y/o la competencia entre ellos generarán que estos regímenes de estratificación varíen en escalas diurnas, estacionales y anuales.



**Figura 1.3: Forzantes físicos que participan en la estratificación y en la mezcla.** Los efectos que producen los forzantes físicos sobre la columna de agua definirán el grado de estratificación en la vertical.

En regiones de plataforma, además de la mezcla turbulenta provocada por el viento des de la superficie hacia niveles más profundos, la columna de agua puede estar influenciada por intensas corrientes de marea que interactúan con el fondo mediante fricción y mezclan desde allí hacia niveles más superficiales. La Figura 1.4 describe la formación de un frente de marea estacional (primavera/verano). Estos frentes se caracterizan por intensos gradientes térmicos y suelen aparecer todos los años, aproximadamente, en la misma localización. Se caracterizan por separar dos regiones: una costera, totalmente mezclada desde el fondo por las corrientes intensas de marea y, otra offshore, estratificada por calentamiento estival (Longhurst, 1998 [34]).



**Figura 1.4: Frente de mareas.**  $f$  frente; el punteado representa líneas de igual densidad. Extraido de Mann y Lazier, 2006 [38].

Existen también otros frentes que se forman en el océano, como lo son las zonas de transición entre la plataforma y el talud (frentes de talud continental). Estos tipos de frentes pueden ser termohalinos, donde el gradiente horizontal y vertical de densidad genera capas de mezcla diferenciales a ambos lados del frente. Todos los frentes oceánicos, tanto costeros como los de mar abierto (u océano profundo), constituyen áreas donde la competencia entre la estratificación y la mezcla que produce flujos verticales de nutrientes dan por resultado un aumento en la producción primaria (Olson et al., 1985 [44]).

### 1.1.1. Profundidad de la capa de mezcla (PCM)

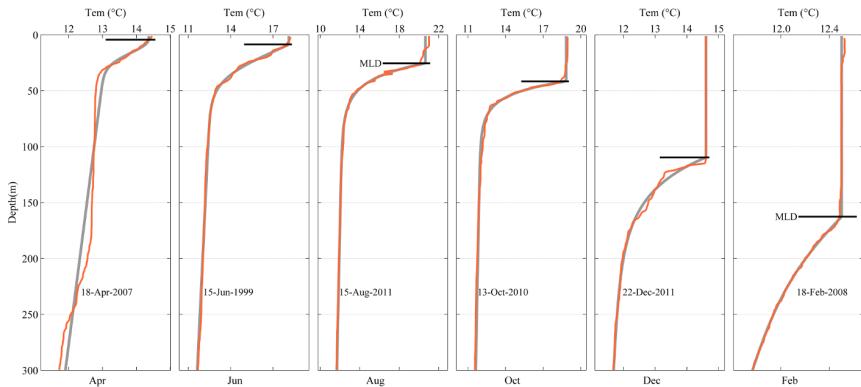
El concepto de PCM se usa en muchos contextos oceanográficos, pero una amplia gama de significados se han unido a él. Es por este motivo, que es necesario hacer una distinción entre mixing layer depth (XLD) y mixed layer depth (MLD) o PCM (Brainerd y Greg, 1995 [1]) ya que estas dos definiciones suelen utilizarse para referirse a la PCM pero involucran significados diferentes. Brainerd y Greg (1995) distinguen ambos términos, considerando que la XLD se refiere al rango de profundidad a la cual las capas superficiales son activamente mezcladas por los procesos turbulentos, mientras que la MLD es el rango de profundidad a la cual las capas superficiales fueron mezcladas en un pasado reciente (ciclo diario o escalas más largas), que es lo que se definió anteriormente como PCM. Dicha distinción también fue propuesta por trabajos anteriores utilizando observaciones (Shay et al., 1986 [61]) y empleando modelos (Woods et al., 1986 [69]). Desde entonces, se han obtenido muchas observaciones y logrado comparaciones entre estas dos variables. En trabajos más recientes, como por ejemplo en Sutherland et al. (2014 [65]), utilizando un perfilador de tecnología avanzada (que permite tomar datos en la capa donde se producen las interacciones mar-atmósfera) realizaron comparaciones entre la MLD y la XLD (estimada a partir de observaciones de turbulencia y empleando distintas tasas de disipación) para el Atlántico Subtropical, sin embargo, no han podido encontrar un método que les permita obtener la XLD a partir de la MLD.

La definición de PCM puede estar basada en diferentes parámetros físicos y, además, representar diferentes escalas temporales (días, meses, entre otros), pero al momento de aplicar el concepto de PCM a un problema oceanográfico en particular se debe tener cuidado con el método elegido para estimarla ya que, la definición debe coincidir con la situación física que se quiere estudiar. La medición directa de la turbulencia en la capa superior es la forma más precisa para determinar la PCM, puesto que los niveles de disipación típicamente decrecen en un orden de magnitud por debajo de la profundidad de alta convección. Sin embargo, no es simple obtener datos sobre la turbulencia lo que hace que no se haya generalizado este método para estimar la PCM. Es por este motivo que los criterios para determinarla se basan, principalmente, en la temperatura ( $T$ ), salinidad ( $S$ ) y densidad potencial ( $\sigma_\theta$ ) (Kara et al., 2000 [30]).

Para cada variable física, el criterio para estimar la PCM suele dividirse, según Monterey y Levitus (1997 [43]), en dos grandes categorías: los que utilizan gradientes y los que utilizan valores límites. Los primeros requieren que la derivada vertical de la variable física en la capa superior sea pequeña comparada con la de la capa inferior, de esta manera, la PCM se situará en la profundidad a la cual el gradiente sea máximo (Figura 1.5), es por ello que implica la existencia de una picnoclina (asociado a la profundidad de la termoclina y/o haloclina). Por otro lado, los criterios que utilizan valores límites o umbrales requieren que la desviación entre la variable y un valor de referencia ( $Z_{ref}$ ) excedan un cierto umbral que puede variar según la ubicación geográfica. En Montégut et al. (2004 [17]) resumen los distintos valores límites empleados en la bibliografía para el cálculo de la PCM (Tabla 1.1).

La Tabla 1.1 muestra la diversidad de criterios existentes en la literatura para estimar la PCM utilizando un umbral y una profundidad de referencia. Sin embargo, la elección de estos dos parámetros (fundamentales para el cálculo) en la mayoría de los casos es arbitraria. Por ejemplo, con el fin de analizar la estructura vertical de las capas superficiales en el Pacífico Norte, Weller y Plueddemann (1996 [68]) utilizan perfiles CTD para estimar la PCM escogiendo un umbral de  $\Delta\sigma_\theta = 0,03\text{kg/m}^3$  con una  $Z_{ref} = 10\text{m}$ . Diversos trabajos

basan su elección de umbral y  $Z_{ref}$  utilizando alguna metodología específica. Por ejemplo, Kara et al. (2000a [29]) utilizan comparaciones estadísticas entre promedios mensuales de densidad y temperatura, obtenidos de una climatología y de series mensuales construidas con observaciones de una estación meteorológica oceánica, encontrando que  $\Delta T = 0,8^{\circ}\text{C}$  a una  $Z_{ref} = 10\text{m}$  permite estimar la PCM a nivel global.



**Figura 1.5:** Ejemplo ilustrativo en donde se determina la PCM como la profundidad del máximo gradiente de densidad observado en distintos meses. Fuente: [http://www.boyta-agl.st.ieo.es/boyta\\_agl/mixed.html](http://www.boyta-agl.st.ieo.es/boyta_agl/mixed.html); noviembre, 2016.

Author and Area Studied	Profiles	MLD Threshold Criterion	$Z_{ref}$	Criterion Choice
Sprintall and Roemmich [1999], Pacific Ocean	ind	$\Delta T = 0.1^{\circ}\text{C}$ $\Delta\sigma_0 = \frac{\partial\sigma_0}{\partial T} \Delta T$ with $\Delta T = 0.1^{\circ}\text{C}$	10 m	direct observation of more than 1000 profiles
Kara et al. [2000b], Global Ocean	ave	$\Delta T = 0.8^{\circ}\text{C}$ $\Delta\sigma_0 = \sigma_0(T + \Delta T, S) - \sigma_0(T, S)$ with $\Delta T = 0.8^{\circ}\text{C}$	10 m	statistical comparison with Ocean Weather Station data
Monterey and Levitus [1997], Global Ocean	ave	$\Delta T = 0.5^{\circ}\text{C}$ $\Delta\sigma_0 = 0.125 \text{ kg m}^{-3}$	0 m	$\Delta\sigma_0$ corresponds to water mass characteristics of subtropical mode water in North Atlantic $\Delta T$ corresponds to $\Delta\sigma_0$ within 17 to 19°C and $S = 35 \text{ PSU}$
Brainerd and Gregg [1995], Pacific Ocean	ind	$\Delta\sigma_0 = 0.05 \text{ to } 0.5 \text{ kg m}^{-3}$	0 m	direct observation of overturning length
Suga et al. [2004], North Pacific	ind	$\Delta\sigma_0 = 0.125 \text{ kg m}^{-3}$	10 m	arbitrary
Thomson and Fine [2003], North Pacific	ind	$\Delta\sigma_0 = 0.01 \text{ to } 0.03 \text{ kg m}^{-3}$	2.5 m	arbitrary
Weller and Plueddemann [1996], North Pacific	ind	$\Delta\sigma_0 = 0.03 \text{ kg m}^{-3}$	10 m	arbitrary
Schneider and Müller [1990], Tropical Pacific	ind	$\Delta\sigma_0 = 0.01 \text{ or } 0.03 \text{ kg m}^{-3}$	2.5 m	corresponds to subjective estimate of MLD
Obata et al. [1996], Global Ocean	ave	$\Delta T = 0.5^{\circ}\text{C}$	0 m	arbitrary
Thompson [1976], North Pacific	ind	$\Delta T = 0.2^{\circ}\text{C}$	3 m	arbitrary
Spall et al. [2000], North Atlantic	ind	$\Delta T = 0.5^{\circ}\text{C}$	0 m	arbitrary
Foltz et al. [2003], Tropical Atlantic	ind	$\Delta T = 0.5^{\circ}\text{C}$	0 m	arbitrary
Rao et al. [1989], Indian Ocean	ind	$\Delta T = 1^{\circ}\text{C}$	10 m	arbitrary

<sup>a</sup>The type of profiles investigated by the author is also mentioned, “ind” for individual and “ave” for monthly averaged profiles, and the way they choose their criterion.

**Tabla 1.1: Ejemplos de valores límites o umbrales para estimar la PCM.**

La PCM será la profundidad a la cual la Temperatura  $T$  o la Densidad Potencial ( $\sigma_\theta$ ) cambian un cierto valor límite, ( $\Delta T$ ) o ( $\Delta\sigma_\theta$ ), relativo a un cierto valor de referencia  $Z_{ref}$ . Extraído de Boyer Montégut et al. (2004). [17]

A pesar de las dificultades para establecer una definición única de la PCM, las climatologías de esta variable son esenciales para la comprensión del sistema climático y para mejorar y validar las parametrizaciones de la capa de mezcla en los modelos oceánicos. En el área biológica, las climatologías de la PCM permiten desarrollar modelos estacionales de ecosistemas para obtener simulaciones precisas del ciclo anual y la producción total en la zona eufótica (Fasham, 1995 [20]). A nivel global, se puede considerar que Levitus (1982 [33]) fue el precursor de esta área ya que desarrolló un Atlas Climatológico para el Océano Global donde utilizó como umbral un valor de  $\Delta\sigma_\theta = 0,125\text{kg/m}^3$  a una  $Z_{ref} = 0\text{m}$  característico de masas de agua subtropicales del Atlántico Norte. Siguiendo con esta línea, Monterey y Levitus (1997 [43]) desarrollaron un Atlas Mundial de la PCM para la NOAA (*National Oceanographic Data Center*), utilizando  $\Delta T = 0,5^\circ\text{C}$  a una  $Z_{ref} = 10\text{m}$ . Este Atlas fue creado utilizando climatologías mensuales de perfiles medios de T y densidad potencial ( $\sigma_\theta$ ) y presenta además las desviaciones estándar respecto del valor medio anual climatológico (Monterey y Levitus, 1997 [43]).

A través de una inspección visual de perfiles de  $\sigma_\theta$  y T escogidos al azar, Montégut et al., (2004 [17]) encontraron valores de umbral para  $\sigma_\theta$  ( $\Delta\sigma_\theta = 0,03\text{kg/m}^3$ ) y para T ( $\Delta T = 0,2^\circ\text{C}$ ) utilizando, para ambos casos, una  $Z_{ref} = 10\text{m}$  para evadir el ciclo diurno de la capa de mezcla. Utilizando estos nuevos valores y con una base de datos histórica global, desarrollaron una climatología de la PCM ( $2^\circ \times 2^\circ$ ) como se observa en la Figura 1.6. Esta climatología presenta un fuerte ciclo estacional en los subtrópicos y en latitudes medias con un rango que va desde los 20 m en verano hasta 150 m en invierno. Además, el máximo valor de PCM se encuentra en la región de formación de aguas profundas (Atlántico Norte) durante el invierno y tiene un valor promedio anual de más de 100 m, mientras que en latitudes medias el promedio anual de la PCM es aprox. 70 m.

Previamente, usando como base el *Levitus World Ocean Atlas* (1994) e interpolando los perfiles de temperatura, Kara et al. (2003 [31]) obtuvieron una climatología para la PCM a nivel global, en la cual encontraron características similares a las de Boyer Montégut et al. (2004 [17]) con diferencias en la región subpolar entre el Pacífico Norte y el Atlántico Norte, producto de las *barrier layers* (se generan cuando la profundidad de la halocina es menor que la de la termocina [25]) que provocan que el Pacífico Norte no tenga valores de PCM tan profundos como los tiene el Atlántico Norte durante el invierno (Kara et. al., 2000 [29]).

A escala regional, se pueden encontrar climatologías elaboradas a partir de datos hidrográficos históricos y observaciones recientes. Por ejemplo, Suga et al. (2004 [64]) elaboraron una climatología de la PCM para el invierno del Pacífico Norte utilizando como umbrales los valores de  $\Delta\sigma_\theta = 0,125\text{kg/m}^3$  a una  $Z_{ref} = 10\text{m}$ . Posteriormente, Dortenzio et al. (2005 [18]) estudiaron la variabilidad estacional de la PCM para el Mar Mediterráneo usando perfiles *in situ* y la metodología propuesta por de Boyer Montégut et al. (2004 [17]). La diferencia con este trabajo radica en la ausencia de la interpolación espacial de los mapas finales y en una mejora de la resolución espacial para poder describir correctamente el comportamiento de la PCM en el Mar Mediterráneo.

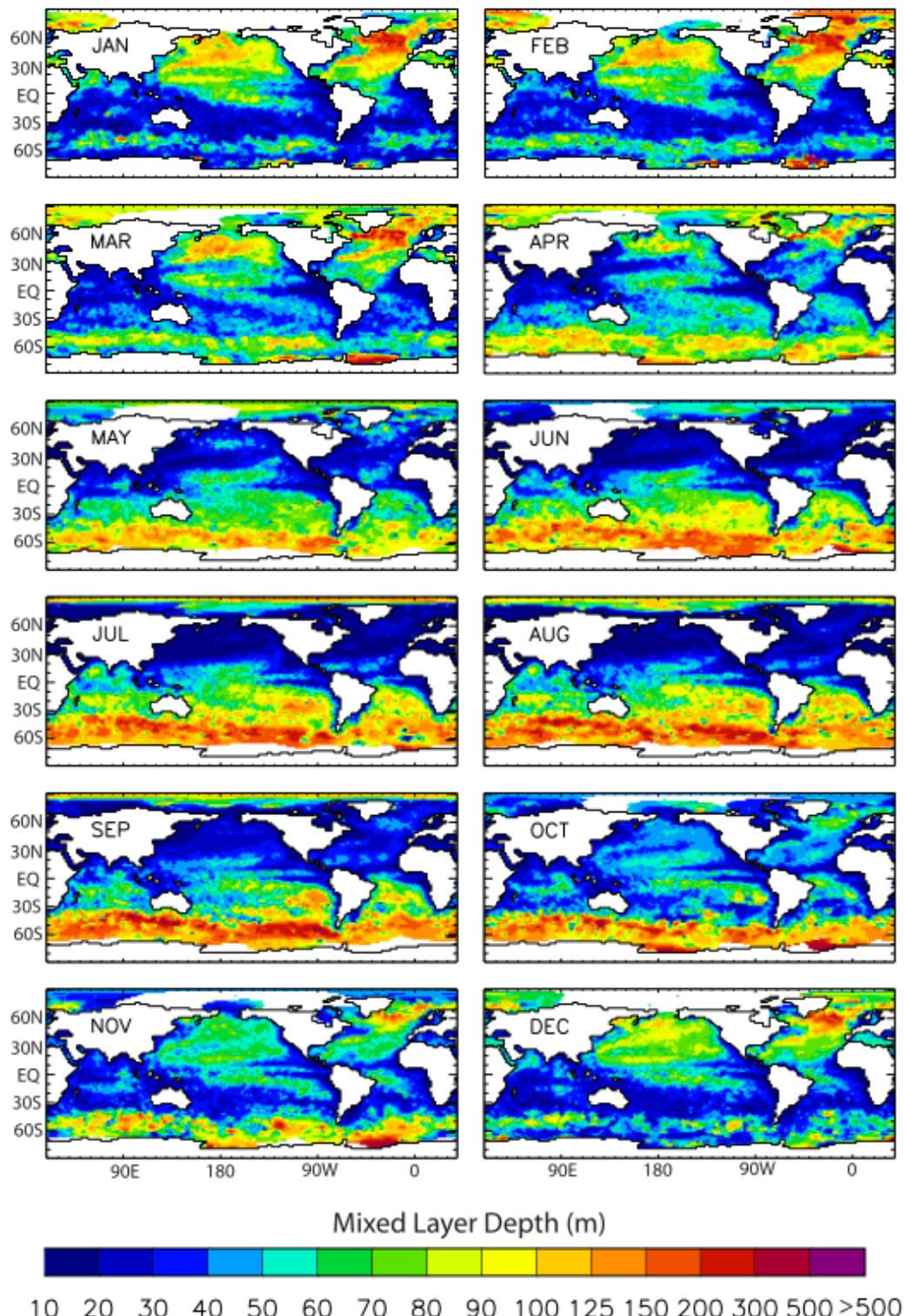


Figura 1.6: Capa de mezcla (PCM). Climatología estimada a través de perfiles individuales con un valor umbral para  $T$  de  $\Delta T = 0,2^{\circ}\text{C}$  a  $Z_{\text{ref}} = 10\text{m}$ . Los valores fueron determinados a través de una inspección visual de los perfiles y series de tiempo. [7]

Además de los criterios descriptos anteriormente, existen otros menos convencionales para estimar la PCM usando perfiles individuales. Thomson y Fine (2003 [67]) utilizan dos décadas de observaciones obtenidas con CTD en el Pacífico Norte para estimar la PCM empleando un valor límite de  $\Delta\sigma_\theta = 0,01\text{kg/m}^3$  a una  $Z_{ref} = 10\text{m}$  (este umbral suele ser representativo de la profundidad diurna de la capa de mezcla). Para lograr la estimación introducen, además, técnicas computacionales tales como cuadrados mínimos, métodos integrales y *split and merge* (SM) para identificar la profundidad exacta de la CM que sugerirían una mejora en la estimación de la PCM sobre los criterios que utilizan solamente umbrales. Lorbacher et al. (2006 [35]) introducen un nuevo criterio basado en la curvatura de los perfiles de  $\sigma_\theta$ , T o S, localizando la parte más horizontal del perfil en la capa superficial para demarcar la PCM. Este método permite estimar la capa de mezcla utilizando diferentes resoluciones en la vertical para los distintos conjuntos de datos y sirve para una gran variedad de perfiles que presentan distinta estratificación.

## 1.2. Área de estudio

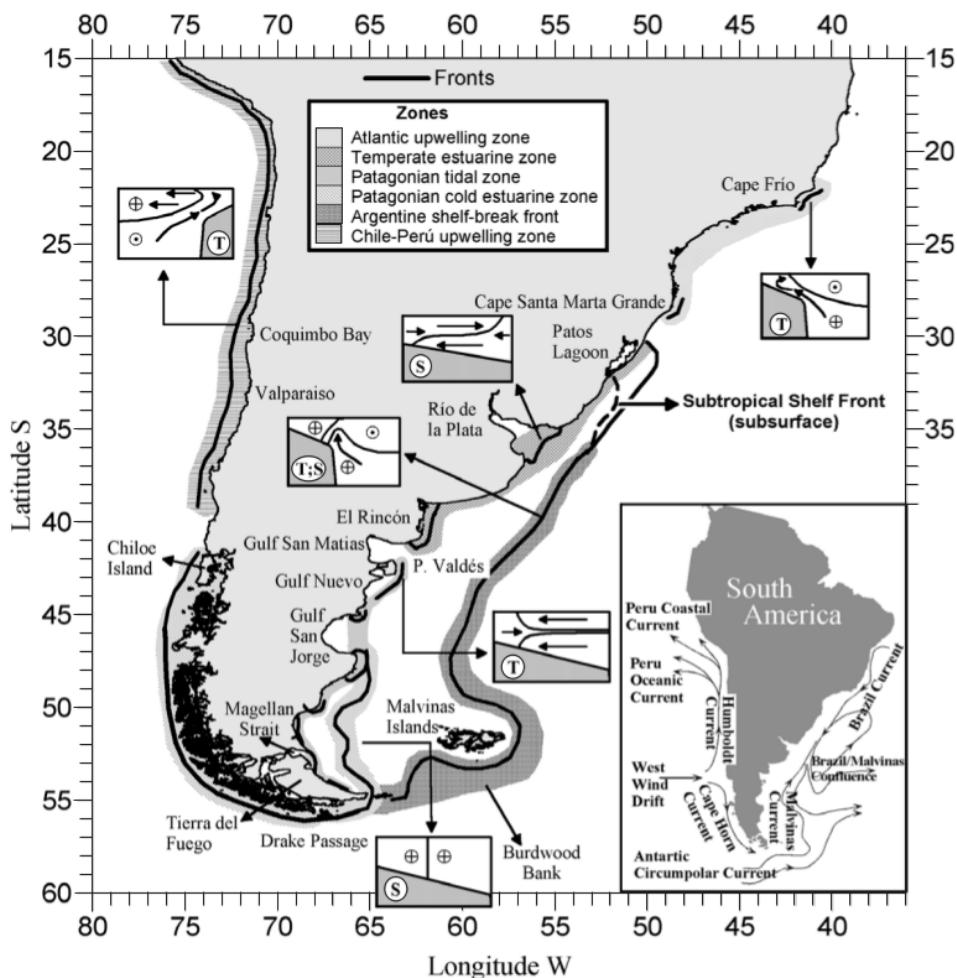
El área de estudio del presente trabajo comprende la plataforma continental del océano Atlántico Sudoccidental (PCASO), que se extiende desde los 55°S, en el extremo sur de Tierra del Fuego, hasta los 35°S. Esta región abarca uno de los ecosistemas más productivos del océano global (Falabella et al., 2009 [19]) ya que reúne todos los elementos necesarios para que se produzcan intensos florecimientos de fitoplancton.

En particular, se puede caracterizar a la plataforma continental patagónica como una de las planicies submarinas más extensas y menos profundas del planeta. Se extiende entre la costa y el talud continental (entre los 40-35°S y 55-35°S) y se ensancha hacia el sur. Imágenes satelitales de clorofila-a (Chl-a) indican que el fitoplancton es unas tres veces más abundante allí que la media del océano mundial (Romero et al., 2006 [55]). En particular, la productividad biológica en la plataforma patagónica es notablemente mayor que la presente en la plataforma de Brasil (Lutz y Carreto, 1991 [36]).

La capa superior del océano Atlántico Sudoccidental está dominada por la confluencia de las aguas Subtropicales y Subantárticas asociadas a los flujos opuestos de las corrientes de Brasil y Malvinas. La Corriente de Malvinas es una rama de la Corriente Circumpolar Antártica, fluye hacia el norte a lo largo del talud continental siguiendo la isobata de 1000 m (Matano et al., 2010 [41]), transporta aguas relativamente frías (15°C) y poco salinas (34.2 PSU), separa aguas subantárticas de plataforma de aguas de océano abierto y constituye un importante aporte de macro nutrientes a la zona del Atlántico Sudoccidental (Piola et al., 1997 [48]). La corriente de Brasil, con un transporte medio que fluctúa entre 25 y 40 Sv (Piola y Matano, 2001 [47]), ocupa predominantemente los primeros 500 m de la columna de agua, ingresa desde el Norte transportando agua tropical bordeando el talud y avanza hacia el sur, transportando aguas relativamente salinas (36 PSU), hasta encontrarse con la Corriente de Malvinas alrededor de los 38°S formando la Confluencia Brasil-Malvinas (CBM) (Gordon y Greengrove, 1986 [26], Saraceno y Provost, 2012 [57]). Esta zona de transición o confluencia se caracteriza por ser muy energética y por generar eddies cálidos y fríos además de filamentos (Garzoli y Garraffo, 1989 [23], Piola et al., 2010 [41]). En la PCASO la circulación media está dominada por la Corriente de Plataforma (Brandhorst and Castello, 1971 [12]) que fluye hacia el NE con un transporte medio de entre 1 y 2 Sv (Palma et al., 2008 [45]; Piola y Rivas,

1997 [48]).

El área de estudio presenta distintas clases de frentes oceánicos, estrechamente vinculados a rasgos del fondo marino (Figura 1.7), que cubren distintas escalas de espacio y tiempo. Según Acha et al. (2004 [1]) los frentes en el Atlántico SO se ubican distribuidos en seis zonas en función de los principales forzantes, de las variables físicas primarias, de la estacionalidad y de los mecanismos de enriquecimiento, destacándose entre ellos los frentes Subantártico, Talud y estuario del Río de la Plata. Además, en la plataforma interior se destacan los denominados frentes de marea y el frente de plataforma media.



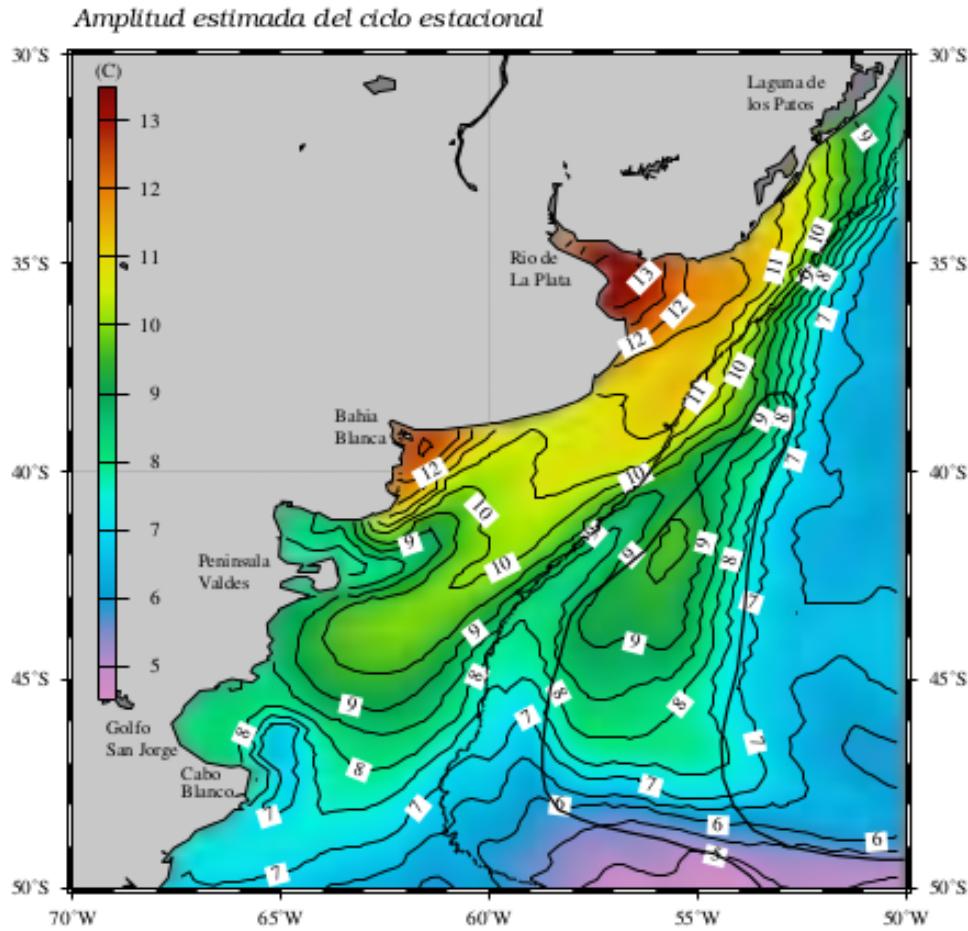
**Figura 1.7: Regiones frontales en el Atlántico Sudocidental.** Los diagramas dentro de las cajas representan la estructura vertical de los frentes. Las líneas negras muestran la superficie de densidad, las flechas muestran el flujo de agua, los círculos con una cruz dentro representan flujos entrantes a la hoja, los círculos con un punto dentro representan flujos salientes de la hoja. “T” o “S” hacen referencia a la variable principal que caracteriza el frente. En el mapa ubicado en la orilla inferior derecha se muestra las corrientes principales y la circulación general superficial para el Atlántico Sudocidental. Extraído de Acha et al. (2004) [1].

La plataforma patagónica se encuentra influenciada por los vientos oestes que fuerzan la circulación superficial con gran intensidad (pueden superar los 10 m/s) (Palma et al., 2008 [45]). Distintos trabajos han indicado que los oestes estarían aumentando su intensidad

y, a su vez, estarían desplazando su máximo hacia el sur (Marshall, 2003 [39]; Garreaud et al., 2009 [22]), lo que generaría un impacto en la circulación regional y global. Al aumentar la intensidad de estos vientos puede llegar a intensificarse el ingreso de nutrientes a la capa fótica y, de esta manera, aumentar la Chl-a que es un indicador de la abundancia del fitoplancton (Carranza y Gille et. al., 2014 [24]). Además, para el frente del talud continental se han encontrado correlaciones significativas entre el arrastre del viento paralelo a la batimetría y el mantenimiento de las floraciones de fitoplancton en el verano (Carranza et. al., 2015 [13]).

Con respecto al período de calentamiento/enfriamiento en las distintas áreas de la PCA-SO, Rivas (1994 [52]) analizó la variación estacional de la temperatura integrada en la vertical en la región de la plataforma continental entre 40 y 50°S. Rivas (1994) concluye que tanto la amplitud como la fase del ciclo anual son controladas por las variaciones estacionales del flujo de calor a través de la superficie, mientras que los procesos advecivos y difusivos ejercen efectos secundarios.

Martinez (2005 [40]) analizó las SST (*Sea Surface Temperature*) máximas y mínimas y sus fases. Para la plataforma norte concluyó que el período de enfriamiento del Río de La Plata es un mes más corto ( 5.5 meses) que el de los golfos San Jorge, Nuevo y San Matías y que el período de calentamiento del Río de la Plata dura un mes más. Argumentó que dos son los factores que producen estas diferencias: el estuario del Río de la Plata es menos profundo que los golfos y se encuentra en latitudes menores, por lo tanto las primaveras resultan mas largas que los otoños. Estas diferencias de fase en las SST mínimas y máximas y por lo tanto en los períodos de calentamiento/enfriamiento resultan también clave en el espesor y dinámica estacional de la capa de mezcla pues, en su trabajo, Martínez argumenta que la amplitud térmica de la superficie del mar depende del balance radiativo a través de la superficie, de la profundidad de la capa de mezcla y de la mezcla de calor a través de su base (Figura 1.8).



**Figura 1.8: Amplitud del ciclo estacional de la TSM.** La amplitud del ciclo anual de la temperatura fue calculada a partir de la diferencia entre la máxima y la mínima TSM. La línea punteada indica la isobata de 200 m y la negra el Frente Subantártico estimado por A. Piola. Extraído de Martínez [40].

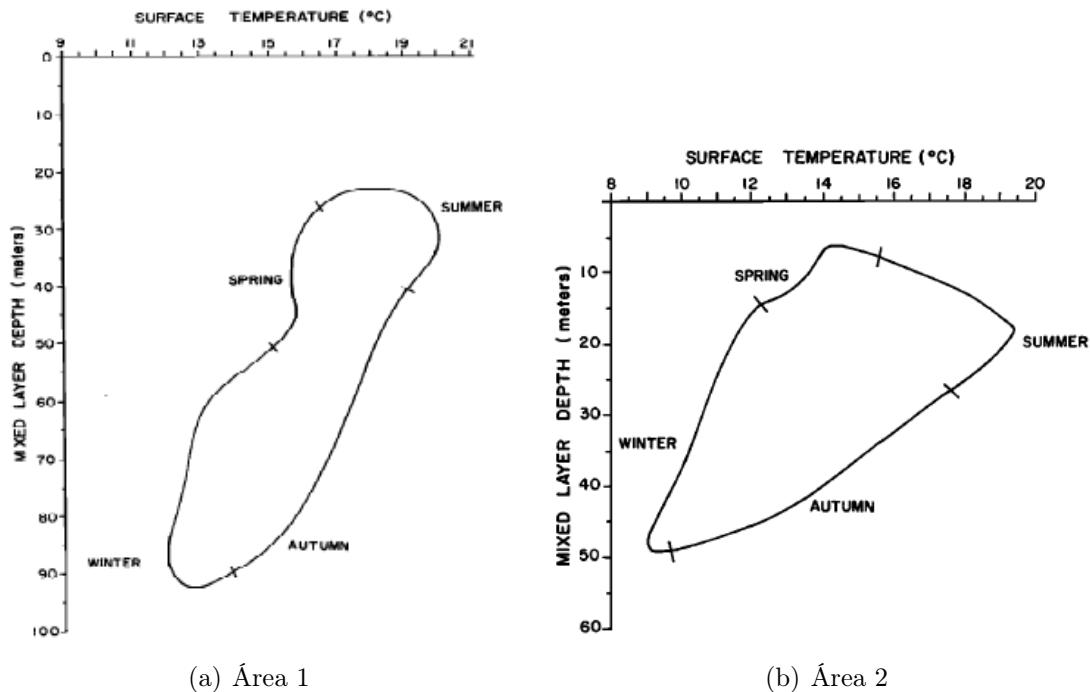
Risaro (2015 [51]) en su análisis de tendencias de la SST (o TSM, temperatura superficial del mar) encontró que la plataforma al norte de 47°S se está calentando y que la región al sur de esa latitud está enfriándose. El enfriamiento observado en el sector austral de la plataforma puede deberse, en parte, a la intensificación de la mezcla vertical debido al incremento de la intensidad del viento, principalmente causada por el aumento de la velocidad zonal. Por otro lado, la evolución temporal de las anomalías de temperatura en la región de calentamiento puede estar relacionada con un proceso advecutivo de aguas cálidas desde el norte. Todos estos resultados tienen relación con la PCM que en este trabajo se pretende caracterizar.

### 1.2.1. Antecedentes en el área de estudio

En la región de la Plataforma Continental Argentina, al sur de 35°S, existen estimaciones de PCM realizadas (a partir de datos *in situ*) y publicadas para lugares y momentos particulares del año que en general se corresponden con verano o primavera (Carreto et al., 2016 [14], Sabatini et al. 2012 [56], García et al., 2001 [21]). También ha sido estimada a partir de modelos numéricos (Alvarez et al., 2016 [2]). Sin embargo, el único trabajo publicado para

el Atlántico Sudoccidental en el que se caracterizó la PCM a partir de un único criterio, sus valores medios estacionales y la relación con la temperatura de superficie, es el de Blanc et al. (1983 [8]). En dicho trabajo, se utilizaron datos de temperatura de batítermógrafos para el período 1954-1980 y utilizando un criterio de gradiente térmico ( $>0.2$  grados cada 20m) encontraron dos relaciones distintas de acuerdo a la presencia de las dos masas de agua características de la región (Subtropical y Subantártica) y caracterizaron los valores medios de PCM vs. SST para cada estación del año (Figura 1.9).

No se ha encontrado en la bibliografía existente ningún trabajo posterior al de Blanc et al. (1983 [8]), así como tampoco ningún trabajo que relacione la PCM con la presencia de florecimientos de fitoplancton de manera regional para la PCASO (al sur de  $35^{\circ}\text{S}$ ).



**Figura 1.9: Relación entre la PCM y la SST.** Valores medios de PCM, promediados para cada estación del año, vs. su correspondiente SST para el Área 1 comprendida entre  $35\text{-}40^{\circ}\text{S}$  y  $50\text{-}55^{\circ}\text{O}$  (a) y para el Área 2, comprendida entre  $35\text{-}40^{\circ}\text{S}$  y  $55\text{-}65^{\circ}\text{O}$  (b) del Atlántico Sudoccidental. Extraído de Blanc et al., 1983 [8].

En esta tesis se propone caracterizar la distribución espacio-temporal la PCM para la PCASO al sur de  $35^{\circ}\text{S}$  y relacionarla con la presencia de floraciones de fitoplancton. Para ello se definen los siguientes objetivos específicos:

- Procesar datos históricos y seleccionar aquellas estaciones oceanográficas que cumplan con una resolución vertical adecuada para poder estimar la PCM.
- Definir la PCM a partir de distintos métodos existentes en la bibliografía: métodos no convencionales y a partir de criterios que utilicen umbrales característicos de cambios verticales en  $T$  o  $\sigma_{\theta}$ .

- Ajustar los umbrales obtenidos de la bibliografía para la región de estudio. Seleccionar un único criterio que sea válido para definir la PCM en toda la región y época del año.
- Caracterizar la distribución espacio temporal de la PCM y analizar su variabilidad.

Esta tesis está conformada por 4 capítulos. En el Capítulo 2 se detallan los conjuntos de datos utilizados y se explican las metodologías empleadas. En el Capítulo 3 se presentan los resultados obtenidos para definir un único criterio para estimar la PCM en la Plataforma Argentina y se presentan también los mapas estacionales de la PCM obtenidos y su correspondiente análisis comparando con trabajos anteriores. Luego, se discuten dichos resultados. Finalmente, en el Capítulo 4 se resumen las conclusiones de este trabajo.

# Capítulo 2

## Conjunto de datos y metodología

En este capítulo se describen los datos utilizados para realizar la investigación y la metodología empleada para tratarlos.

Esta tesis hace uso específico de datos CTD de tres campañas GEF (Sección 2.1.1) con el propósito de obtener un único criterio que permita estimar la PCM para toda la región de la Plataforma Argentina comprendida entre los 27°S-57°S, desde la costa hasta los 40°O y para todas las estaciones del año. Se utilizan algunas estaciones de un set de datos histórico mayor (Sección 2.1.2) para calibrar y validar el criterio. Luego se aplica este criterio a un set de datos histórico mayor (Sección 2.1.2) de la Plataforma Argentina y, por último, se estudia la posible relación entre la PCM estimada y los máximos sub-superficiales de fitoplancton identificados a partir de perfiles verticales de fluorescencia (Sección 2.1.3).

### 2.1. Datos

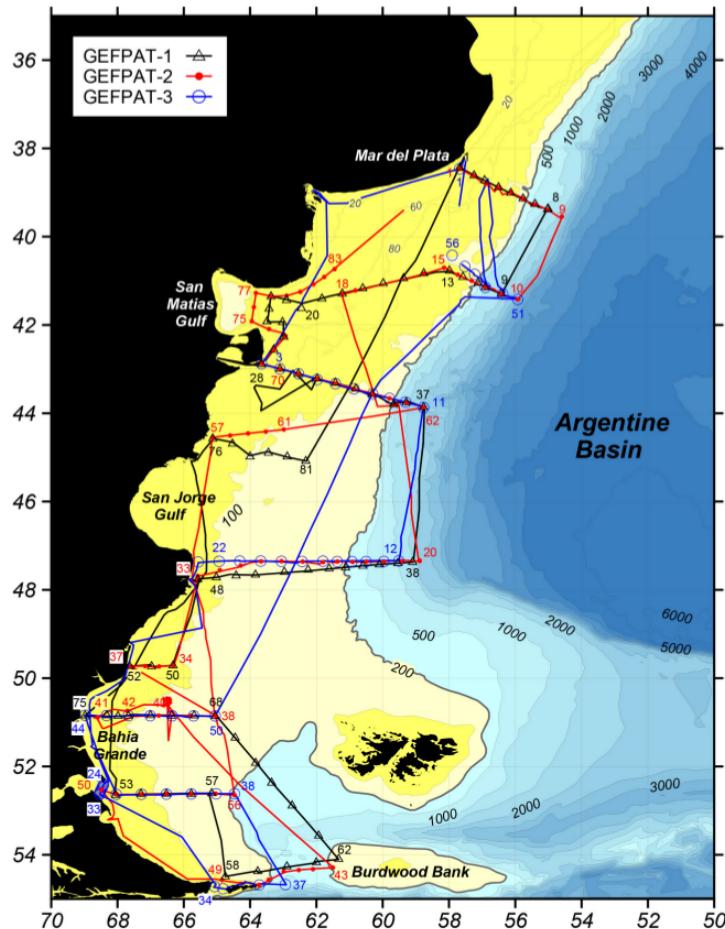
#### 2.1.1. Datos para obtener un criterio único de estimación

En el marco del Proyecto Contaminación Costera, Prevención y Gestión Marina (*Global Environment Facility* (GEF) Patagonia), que es parte de la agenda científica del Programa de Desarrollo de las Naciones Unidas (UNDP, por sus siglas en inglés), entre los años 2005 y 2006 se llevaron a cabo tres campañas oceanográficas multidisciplinarias con el fin de recolectar datos hidrográficos y biológicos que ayudaran a mejorar el conocimiento sobre el medioambiente y la biodiversidad marina en la plataforma continental del Atlántico Sudoccidental (Charo y Piola, 2014 [15]). Las campañas se realizaron a bordo del Buque Oceanográfico A.R.A. Puerto Deseado y abarcaron la Plataforma Argentina entre los 38°S-55°S y 70°O-54°O como muestra la Figura 2.1. En cada una de ellas se realizaron estaciones CTD de las cuales se obtuvieron perfiles verticales de salinidad (S) y temperatura (T) con una resolución vertical de 1 m.

La campaña GEF 1 se realizó en octubre de 2005 y cuenta con 82 estaciones CTD (Figura 2.1). Al año siguiente se realizaron las dos campañas restantes, GEF 2 en el mes de marzo, con 83 estaciones CTD y GEF 3 en el mes de septiembre, con 56 estaciones CTD (Figura 2.1).

Varios trabajos recientes que integran información oceanográfica y biogeoquímica (Lutz et al. 2009 [37], Bianchi et al. 2009 [7], Segura et al. 2013 [60], Carreto et al. 2016 [14]) analizan

la plataforma y el talud desde distintas visiones sistémicas del océano utilizando la información colectada durante estas campañas multidisciplinarias que incluyen perfiles verticales de fluorescencia (Sección 2.1.3) y mediciones discretas de clorofila a (Cl-a) *in situ*.



**Figura 2.1:** Posición de las estaciones hidrográficas durante las campañas GEF. En símbolos se muestran la posición de las estaciones CTD y en líneas de colores el recorrido del buque durante el cual se tomaron muestras a bordo. El número de cada estación se muestra en el mismo color que la campaña a la cual pertenece. El degradé de colores de fondo y los contornos indican la topografía en metros. Extraído de Charo y Piola (2014) [13].

## 2.1.2. Datos para caracterizar la PCM en la Plataforma Argentina

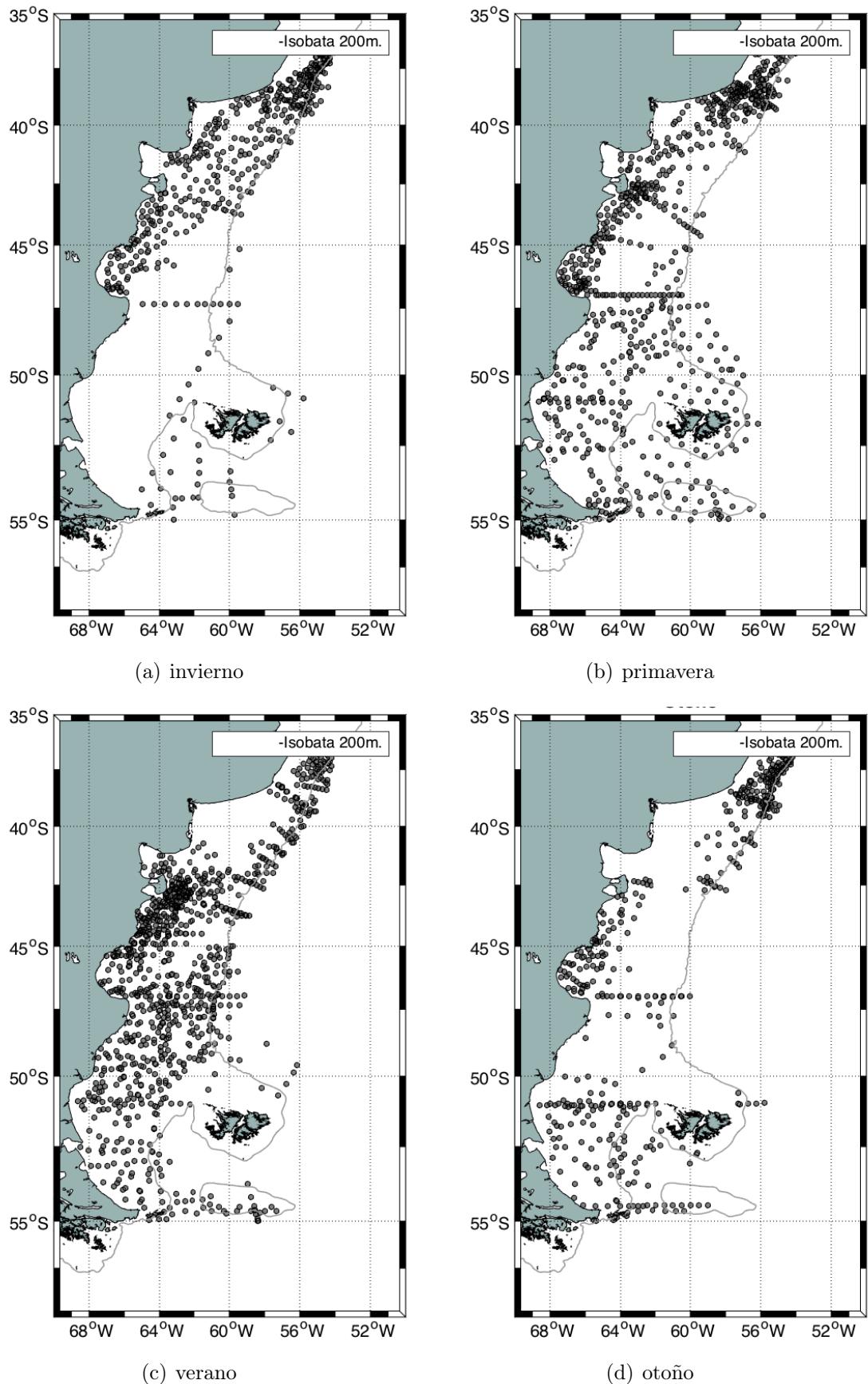
Para caracterizar la PCM estacionalmente se utilizan datos de las bases de datos históricos *World Ocean Database 2013* (WOD13<sup>[10]</sup>) y Base Regional de Datos Oceanográficos (BaRDO<sup>[27]</sup>), correspondientes al período 1911-2010, en el área comprendida entre los 27°S-57°S, desde la costa hasta los 40°O.

WOD13 es un producto basado en los datos presentados al *National Oceanographic Data Center* (NODC) y el *Ocean Climate Laboratory* (OCL) de manera individual por científicos o mediante equipos científicos, así como por centros de datos a nivel institucional, nacional

y regional. Argentina colabora con esta base a través de la Sección Dinámica Oceánica del Servicio de Hidrografía Naval (SHN).

BaRDO es una base de datos creada por el Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo Pesquero (INIDEP), cuenta con datos medidos *in situ*, principalmente en el área de la Plataforma Continental del Atlántico Sudoeste, posee datos propios del INIDEP, de buques nacionales y extranjeros de investigación pesquera y oceanográfica y datos provistos por la *Southern Ocean Data Base* (SODB [2]). Los datos que se utilizan de la base BaRDO corresponden a temperatura, salinidad y densidad obtenidas con CTD y datos de muestras de botellas (Baldoni et al. 2008a [5], 2008b [3] y 2008c [4]).

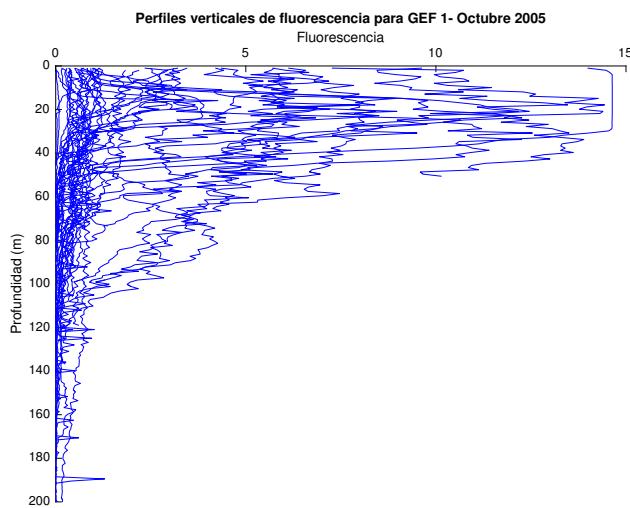
El conjunto de datos descriptos en esta Sección se muestra en la Figura 2.1 la cual muestra las coordenadas geográficas de cada uno de los set de datos *in situ* con los que se cuenta para invierno, primavera, verano y otoño respectivamente. La Figura 2.2a permite observar la posición de los 2187 perfiles verticales de invierno, mayormente concentrados desde 45°S hacia el norte. En verano (Figura 2.2c) y primavera (Figura 2.2b) se cuenta con 2785 y 1984 perfiles respectivamente. Las zonas menos muestreadas es la región frente a Bahía Blanca en el verano y en áreas en la plataforma media entre 43°S y 47°S en la primavera. La Figura 2.2d muestra la posición de los 1941 perfiles de otoño con baja representación en el centro y parte exterior de la plataforma.



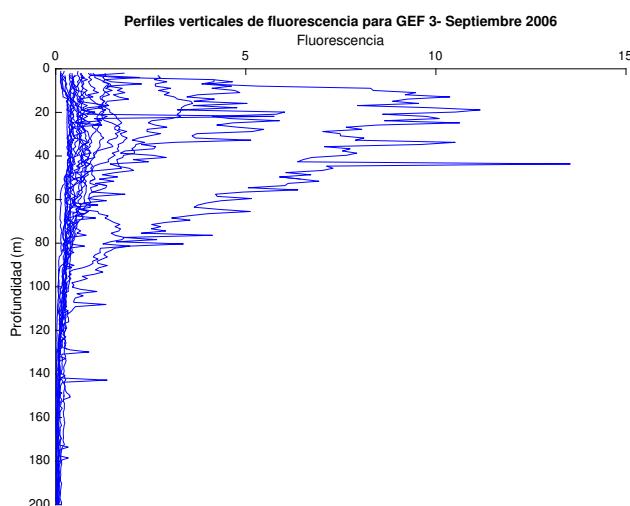
**Figura 2.2:** Posición de las estaciones hidrográficas del conjunto de datos descriptos en la Sección 2.1.2. En círculos grises se muestra la posición de los datos muestreados *in situ*.

### 2.1.3. Datos de Fluorescencia indicativos del Máximo Sub-superficial de Clorofila

Los perfiles verticales de fluorescencia utilizados para correlacionar con la PCM calculada provienen de las campañas GEF (1 y 3). A modo de ejemplo ilustrativo, en las Figuras 2.3 y 2.4 se observan los perfiles de fluorescencia para las estaciones que presentan estratificación de las campañas GEF 1 y 3 respectivamente, donde puede observarse la heterogeneidad de los perfiles para las diferentes estaciones.



**Figura 2.3:** Perfiles verticales de fluorescencia (clorofila 59) para las estaciones que presentan estratificación del conjunto de datos GEF 1 Sección 2.1.1. Los perfiles verticales de fluorescencia se muestran en líneas azules.



**Figura 2.4:** Perfiles verticales de fluorescencia (clorofila 59) para las estaciones que presentan estratificación del conjunto de datos GEF 3 Sección 2.1.1. Los perfiles verticales de fluorescencia se muestran en líneas azules.

Para obtener mediciones *in situ* continuas de clorofila-a en la columna de agua, se utiliza un fluorómetro (Seapoint, [59]). La clorofila-a en el volumen de detección es excitada mediante una luz azul y emite fluorescencia en el rojo que pasa a través de la ventana del detector. Una aclaración importante es que una iluminación natural intensa y fluctuante puede causar una señal ruidosa. Esto puede ocurrir en las aguas superficiales bajo condiciones de luz intensa. Sin embargo, en este trabajo se trabaja sólo con en el máximo sub-superficial, es decir, no utilizamos datos de superficie.

El fluorómetro es un sensor que mide voltajes, el software de adquisición de datos en tiempo real pasa esos valores clorofila-a según la fórmula dada por la Ecuación 2.1.

$$(2.1) \quad Clorofiladesalida(mg/l) = (Voltaje * Rango/5) + Offset$$

La medición de clorofila-a y la calibración de fluorómetros de clorofila es algo inexacta, sin embargo la principal conclusión de Mignot et al. (2011 [42]) es que existen relaciones entre los descriptores de la forma del perfil y la clorofila-a. Estas relaciones se pueden volver a utilizar para reconstruir el perfil de fluorescencia calibrada con clorofila-a, sin ninguna otra información externa. Este método es autosuficiente, ya que no requiere ninguna variable accesoria adicional (por ejemplo CTD, perfil radiométrico (Xing et al., 2011 [70]), estimaciones satelitales de clorofila-a (Boss et al., 2008 [9])). Carranza (artículo en preparación) siguió la metodología de Mignot et al. (2011 [42]) en el Océano Austral y no obtuvo buenos resultados (comentario personal), sin embargo al igual que estos autores muestran en su trabajo del 2011, Carranza afirma que sus resultados (aun sin publicar) indican que la profundidad del máximo sub-superficial de fluorescencia no cambia, aunque sí cambia su magnitud (se reduce). En esta tesis se pretende analizar la posible correlación entre el máximo sub-superficial de fluorescencia (indicativo de presencia acumulada de fitoplancton) y la PCM, por lo tanto se utiliza el perfil del fluorómetro de las campañas GEF 1 y 3 sin corregir.

La relación entre fluorescencia y clorofila-a depende del tipo de fitoplancton presente y de las variables ambientales que afectan la fisiología de las células, así como también de la presencia de compuestos orgánicos disueltos y materiales en suspensión. Por lo tanto los datos de fluorescencia *in vivo* brindan información relativa sobre la distribución de concentración de clorofila (Romero, 2008 [54]).

## 2.2. Metodología

### 2.2.1. Metodología para obtener un criterio único

Con el objetivo de obtener un criterio único para estimar la PCM en la Plataforma Argentina se utilizan los perfiles verticales de las campañas GEF (T, S y  $\sigma_\theta$ ). La elección de esas variables para estimar la PCM es coincidente con las utilizadas en la bibliografía (Tabla 1.1). La inspección visual preliminar de los perfiles de  $\sigma_\theta$  permitió observar que varios de ellos son totalmente homogéneos desde la superficie a la profundidad máxima medida (como son datos de CTD esta profundidad difiere, a lo sumo, en 10 m respecto del fondo, ya que el CTD cuenta con un altímetro sónico para no golpearlo con el fondo), es decir, se encontraron estaciones CTD que se caracterizan por tener un valor casi constante en las variables físicas (T, S y  $\sigma_\theta$ ). Debido a que esta clase de perfiles no presentan estratificación

y, por ende, son aguas totalmente mezcladas, se decidió no considerarlos en el análisis. Para ello se definió un criterio que permite identificar perfiles homogéneos para luego descartarlos. Este criterio establece que si en un perfil la diferencia entre la  $\sigma_\theta$  de superficie y la  $\sigma_\theta$  correspondiente a la máxima profundidad medida es estrictamente menor que  $0,15kg/m^3$  entonces es considerado homogéneo (Ecuación 2.2).

$$(2.2) \quad \begin{cases} \text{si } \sigma_\theta|_{Z_{max}} - \sigma_\theta|_{Z_{sup}} < 0,15kg/m^3 \rightarrow \text{perfil homogéneo} \\ \text{si } \sigma_\theta|_{Z_{max}} - \sigma_\theta|_{Z_{sup}} \geq 0,15kg/m^3 \rightarrow \text{perfil no homogéneo} \end{cases}$$

Para determinar la PCM de cada uno de los perfiles no homogéneos se escogieron once métodos diferentes de la bibliografía existente (Tablas 2.1, 2.2 y 2.3). La Tabla 2.1 muestra el criterio que utiliza los máximos gradientes de variables físicas, tales como  $\sigma_\theta$  y T, para identificar la PCM. Este criterio calcula los gradientes verticales de la variable física, es decir, las variaciones con respecto a la profundidad, y localiza la profundidad a la cual se produce el máximo cambio, definiendo dicha profundidad como la PCM. Los criterios que utilizan umbrales (Tabla 2.2) calculan diferencias entre la variable física utilizada a cada profundidad y el valor de la misma a una cierta profundidad de referencia ( $\Delta T$  o  $\Delta\sigma_\theta$ , Ecuación 2.3) y define a la PCM como la profundidad a la cual dicha diferencia (en valor absoluto) excede un cierto valor de umbral.

$$(2.3) \quad \text{Criterio del Umbral} \begin{cases} \Delta\sigma_\theta(z) = \sigma_\theta(z) - \sigma_\theta(z_{ref}) \rightarrow \text{para la densidad potencial} \\ \Delta T(z) = T(z) - T(z_{ref}) \rightarrow \text{para la temperatura} \end{cases}$$

	Criterio	Variable
1	Máximo Gradiente ( $\max \frac{\partial}{\partial z}$ )	Densidad potencial ( $\sigma_\theta$ )
2	Máximo Gradiente ( $\max \frac{\partial}{\partial z}$ )	Temperatura (T)

**Tabla 2.1: Criterios que utilizan los máximos gradientes.** Se muestran los dos criterios seleccionados que utilizan los máximos gradientes para estimar la PCM.

	Criterio	Variable	Umbral	Profundidad de referencia	Autor / Área de estudio
3	Umbral ( $\Delta\sigma_\theta$ )	Densidad potencial ( $\sigma_\theta$ )	$\Delta\sigma_\theta = 0,01kg/m^3$	$Z_{Ref.} = 2,5m.$	Schneider y Müller (1990 <a href="#">[62]</a> ) / Pacífico Tropical
4	Umbral ( $\Delta\sigma_\theta$ )	Densidad potencial ( $\sigma_\theta$ )	$\Delta\sigma_\theta = 0,03kg/m^3$	$Z_{Ref.} = 10m.$	Weller y Pluedeman (1996 <a href="#">[68]</a> ) / Pacífico Norte
5	Umbral ( $\Delta\sigma_\theta$ )	Densidad potencial ( $\sigma_\theta$ )	$\Delta\sigma_\theta = 0,125kg/m^3$	$Z_{Ref.} = 10m.$	Suga (2004 <a href="#">[64]</a> ) / Pacífico Norte
6	Umbral ( $\Delta T$ )	Temperatura (T)	$\Delta T = 0,2^\circ C$	$Z_{Ref.} = 10m.$	Montégut (2004 <a href="#">[17]</a> ) / Océano global
7	Umbral ( $\Delta T$ )	Temperatura (T)	$\Delta T = 0,5^\circ C$	$Z_{Ref.} = 0m.$	Monterey y Levitus (1997 <a href="#">[43]</a> ) / Océano global
8	Umbral ( $\Delta T$ )	Temperatura (T)	$\Delta T = 0,8^\circ C$	$Z_{Ref.} = 10m.$	Kara (2000b <a href="#">[29]</a> ) / Océano global

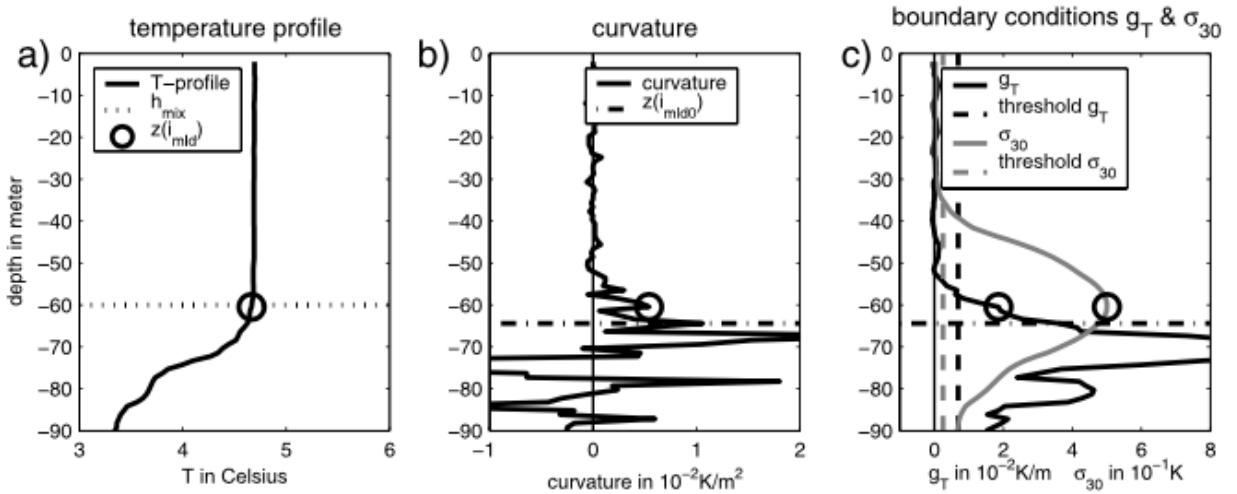
**Tabla 2.2: Criterios que utilizan gradientes.** Se muestran los criterios seleccionados que utilizan los gradientes, valores de umbral y profundidades de referencia para estimar la PCM.

La Tabla 2.3 muestra un criterio menos convencional que los descriptos anteriormente, el mismo fue desarrollado por Lorbacher et al. (2006<sup>35</sup>) y se encuentra disponible como una subrutina para ser utilizada en un software matemático (ver Ápendice, sección 5.1.1<sup>(1)</sup>). La Figura 2.5 muestra de forma esquemática el método para estimar la PCM en un perfil de temperatura de alta resolución. Se cuenta con un perfil de temperatura (Figura 2.5a) al cual se le calcula la derivada segunda o “curvatura” del perfil (Figura 2.5b), ya que el valor primer valor extremo de la curvatura se podría considerar como una característica distintiva de la profundidad a la cual eventos de mezcla recientes penetraron. Posteriormente, se calculan dos parámetros como condiciones de borde que permiten identificar un intervalo donde se encuentra la PCM (Figura 2.5c) para luego buscar el primer extremo de la curvatura e interpolar, a partir de su profundidad, la PCM. Una ventaja de este enfoque, a diferencia de los demás criterios, es que la PCM estimada no es una función lineal de otra cantidad física, como por ejemplo la *SST*, y es poco dependiente de la dinámica de la región y de la estacionalidad.

	Criterio	Variable	Autor/ Área de estudio
9	Gráfico (curvatura del perfil)	Densidad potencial ( $\sigma_\theta$ )	Lorbacher et al./ Océano global <sup>35</sup>
10	Gráfico (curvatura del perfil)	Temperatura ( $T$ )	Lorbacher et al./ Océano global <sup>35</sup>
11	Gráfico (curvatura del perfil)	Salinidad ( $S$ )	Lorbacher et al./ Océano global <sup>35</sup>

**Tabla 2.3: Criterios que utilizan métodos gráficos.** Se muestran los criterios seleccionados que utilizan la curvatura del perfil para ubicar la posición de la PCM.

<sup>35</sup><http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2003JC002157/full>



**Figura 2.5:** Método gráfico desarrollado por Lorbacher et al. (2006 [35]) para estimar la PCM a partir de perfiles verticales de ( $T$ ,  $S$  y  $\sigma_\theta$ ). Se muestra un esquema ilustrativo de la metodología empleada para estimar la PCM usando un perfil vertical de temperatura de alta resolución. a) Se muestra el perfil vertical de temperatura (línea sólida negra), la PCM (o  $h_{mix}$ ) en líneas punteadas negras y el nivel más cercano a la PCM (o  $z_{mld}$ ) con un círculo negro. b) Se muestra la curvatura (línea sólida negra). c) Se muestra los dos parámetros usados como condiciones de borde (línea sólida negra y gris). Extraído de Lorbacher et al. 2006 [35].

Debido a que se quiere caracterizar la variabilidad estacional de la PCM, es necesario eliminar el efecto diurno en cada uno de los perfiles, ya que este efecto provoca que los perfiles verticales de  $\sigma_\theta$  (o  $T$ ) cuenten con dos valores de PCM, uno más superficial (PCM diurna) y otro sub-superficial (PCM estacional). Una manera de lograr esto es seleccionando sólo aquellos perfiles que se hayan registrado durante la noche, pero esto limita la cantidad de perfiles disponibles ya que muchas estaciones fueron realizadas durante el día. Por este motivo, se desarrolló una subrutina (en un software matemático) que permite aplicar cada uno de los criterios descriptos anteriormente para estimar la PCM en los perfiles pero eliminando el efecto diurno presente en cada uno de ellos. Esta subrutina muestra el gráfico del perfil vertical de  $\sigma_\theta$  (o  $T$ ) indicando la PCM estimada cuando es menor que 30 m, y si visualmente se observa que ese valor es consecuencia del efecto diurno la subrutina vuelve a estimar la PCM a partir de esa profundidad. Este límite de 30 m se definió mediante la inspección visual de los perfiles, y teniendo en cuenta que la capa diurna suele encontrarse, en promedio, cerca de los 10 m (de Boyer Montégut et al., 2004 [17]) aunque incluso el ciclo diurno puede actuar hasta los 30 m (Price et al., 1986 [50]). Conjuntamente, en los gráficos de los perfiles se grafican también los valores del gradiente para cada profundidad con el fin de chequear que el valor máximo no sea espurio o un error de los datos.

Para poder analizar la efectividad de cada uno de los criterios en estimar la PCM en el área de estudio, se estimó visualmente un valor para la PCM (PCM<sub>v</sub>) en cada uno de los perfiles (Lorbacher et al. 2006 [35], Thomson y Fine et al., 2003 [67], de Boyer Montégut et al., 2004 [17] y Sprintall y Roemmich 1999 [63]). La estimación consistió en identificar visualmente, en cada uno de los 122 perfiles verticales no homogéneos de  $\sigma_\theta$  (conjuntamente con los de  $T$

y considerando GEF 1, 2 y 3), el valor de la PCM dado por la base de la región superficial homogénea (capa isotérmica o isopicnica) y el comienzo de la picnoclina (o termoclina). De esta manera, se compararon los valores de PCMV con las PCM obtenidas con los once criterios mediante el cálculo de la diferencia entre ambos valores y la creación de histogramas. Se verificó la consistencia estadística a través de regresiones lineales entre cada uno de los once criterios con los resultados obtenidos de la estimación visual. Dados los resultados de estas regresiones y su significancia estadística, se decidió también analizar la mejora de estos resultados a partir del ajuste de nuevos umbrales propios para la Plataforma Argentina.

Para realizar el ajuste de los valores umbrales y de  $Z_{ref}$  y encontrar los valores representativos de la región de estudio se propuso utilizar el Criterio 1 como punto de partida ya que posee mayor correlación con los valores estimados visualmente (ver Sección 3.1). El Criterio 1 es el que calcula los gradientes de  $\sigma_\theta$  y ubica a la PCM como la profundidad a la que se encuentra el máximo valor. Por lo tanto, se propuso usar el valor de  $\sigma_\theta$  en la PCM y restarle a dicho valor el correspondiente valor de  $\sigma_\theta$  a una cierta profundidad de referencia como muestra la Ecuación 2.4, esto nos da un posible valor de umbral para una cierta profundidad de referencia. Repitiendo este procedimiento para todos los perfiles y utilizando dos  $Z_{ref}$  posibles (2.5 m y 10 m) se realizó un histograma para cada uno de ellos (ver Sección 2.4). Las  $Z_{ref}$  se eligieron más profundas que 0 m de modo tal de eliminar efectos indeseados producto de mediciones espurias en superficie cuando el CTD no está correctamente estabilizado y para eliminar posibles efectos diurnos.

$$(2.4) \quad Umbral = \sigma_\theta|_{PCM} - \sigma_\theta|_{Z_{ref}}$$

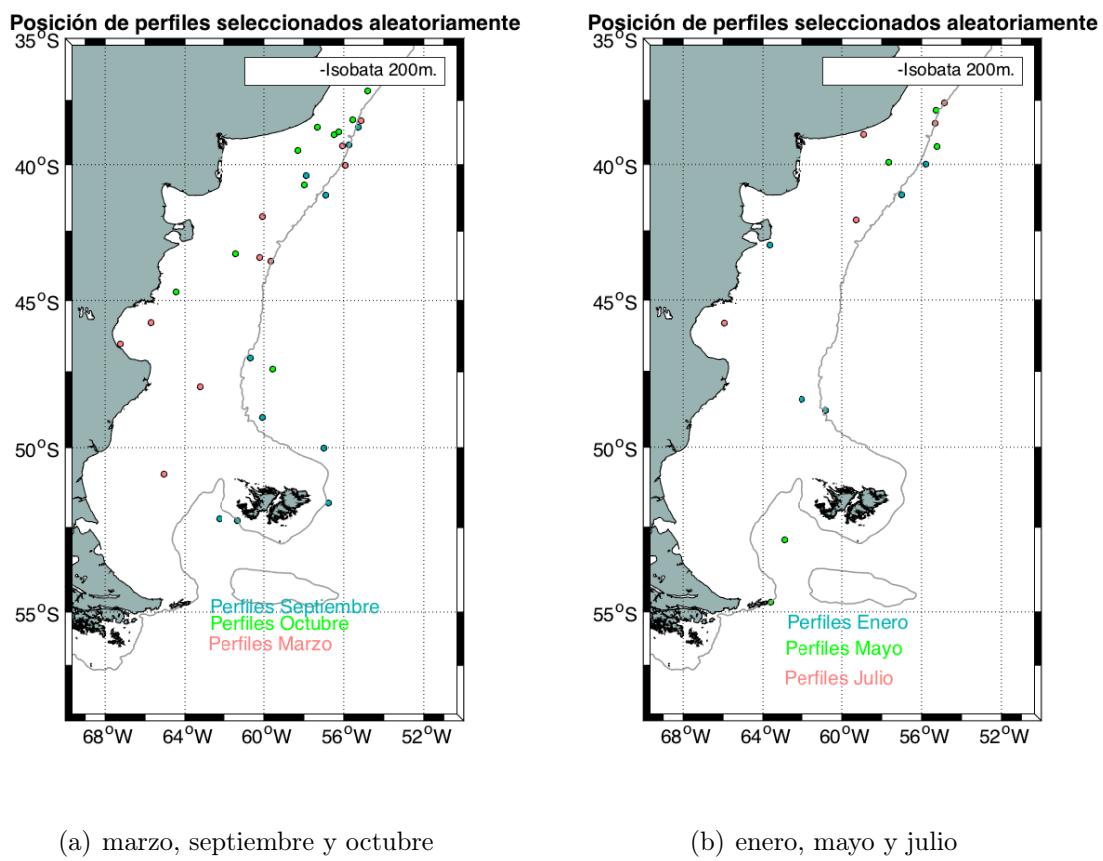
Se seleccionaron determinados umbrales dentro del rango con mayor frecuencia obtenido de los histogramas (ver Sección 3.1, Tabla 3.3), se realizaron regresiones lineales con los valores de PCMV y se analizó su significancia con un test de Student a un 99 % de confianza (ver Sección 3.1, Tabla 3.4).

### 2.2.2. Calibración y validación del criterio único para toda el área y época del año

Para poder escoger un único criterio que permita estimar la PCM en el área de estudio fue necesario hacer una calibración de aquellas pruebas que presentaron mayores valores de correlación con la PCMV estimada de las campañas GEF (Pruebas 2, 3, 4, 7, 8 y 9 y Criterio 1, ver Sección 3.1). Para llevar a cabo la calibración se seleccionaron de manera aleatoria 30 perfiles de  $\sigma_\theta$  de la base de datos histórica independiente (descripta en la Sección 2.1.2) pertenecientes a los mismo meses de las campañas GEF (marzo, septiembre y octubre) en diferentes regiones del área de estudio como muestra la Figura 2.6a. Posteriormente, se estimó la PCMV en cada una de ellos y se la comparó (mediante regresiones lineales) con el valor obtenido a través de las Pruebas 2, 3, 4, 7, 8 y 9 junto con el Criterio 1 (ver Sección 3.1). Se seleccionó como único criterio aquel que presentó mayor valor de coeficiente de determinación ( $R^2$ ).

La validación del criterio ya calibrado (con marzo, septiembre y octubre) se realizó con perfiles pertenecientes a meses característicos de verano (enero), otoño (mayo) e invierno (julio). Para ello, se seleccionaron de manera aleatoria 15 perfiles de  $\sigma_\theta$  de la base de datos

descripta en la Sección 2.1.2 pertenecientes a dichos meses y a diferentes regiones del área de estudio como muestra la Figura 2.6b. Posteriormente, se estimó la PCMv en cada una de ellos y se la comparó con el valor obtenido utilizando el criterio seleccionado como único para estimar la PCM (ver Sección 3.1). Se validó el criterio para estimar la PCM en dichos meses mediante regresiones lineales y utilizando un test de Student (con un 99 % de confianza) para testear su significancia.



(a) marzo, septiembre y octubre

(b) enero, mayo y julio

**Figura 2.6: Posición de las estaciones hidrográficas seleccionadas de manera aleatoria del conjunto de datos descriptos en la Sección 2.1.2 para realizar la calibración (a) y la validación (b) del criterio único.** En la figura a (b) se muestra en círculos de color rosa la posición de los perfiles seleccionados para marzo (julio), en color celeste los de septiembre (enero) y en color verde los de octubre (mayo).

### 2.2.3. Metodología para obtener mapas estacionales de PCM

Para obtener mapas estacionales de PCM se utilizó el conjunto de datos descriptos en la Sección 2.1.2. En una primera instancia se utilizaron los datos separados estacionalmente (invierno, primavera, verano y otoño) según el calendario gregoriano. Muchos de los perfiles de las bases de datos históricas no tienen una resolución vertical adecuada para poder aplicar los criterios de estimación de la PCM. Con el objetivo de descartar este tipo de perfiles se creó una subrutina (en un software matemático) que permitió filtrar aquellos perfiles verticales que no contaran con al menos 30 datos entre la superficie y los 100 m de profundidad.

Posteriormente, se aplicó la subrutina descripta en la Sección 2.2.1 para eliminar los perfiles verticalmente homogéneos de superficie a fondo.

Para obtener los mapas de PCM se utilizaron los perfiles que cumplieron con los filtros descriptos anteriormente y se aplicó sobre ellos el criterio seleccionado como único para estimar la PCM en el área de estudio (ver Sección 3.2).

#### **2.2.4. Metodología para relacionar el máximo sub-superficial de fluorescencia y la PCM**

Entender la relación entre la PCM y la profundidad del máximo sub-superficial de fluorescencia es importante para conocer más sobre la dinámica del fitoplancton y su relación con el medioambiente físico que le permite crecer y desarrollarse. Por lo tanto, con el objetivo de relacionar ambas variables se utilizan los datos descriptos en la Sección 2.1.3.

En las campañas GEF 1 y 3 se localizó la profundidad del máximo sub-superficial de cada uno de los perfiles de fluorescencia correspondientes a las estaciones no homogéneas y se lo comparó con la PCM estimada con el criterio seleccionado como único (ver Sección 3.1) calculando la diferencia entre ambas variables. Posteriormente, se construyeron histogramas para comparar los resultados obtenidos para GEF 1 y 3 de manera individual y luego de manera conjunta.

# Capítulo 3

## Resultados y Discusión

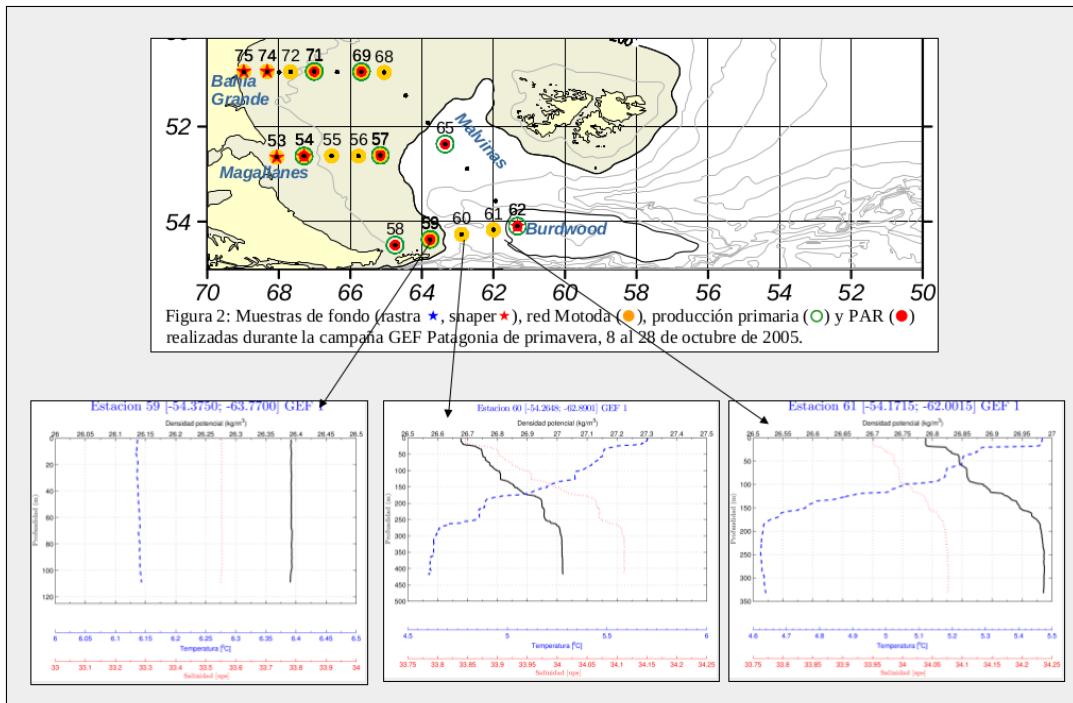
### 3.1. Criterio único

Al realizar un filtrado de perfiles homogéneos (sin capa de mezcla), se obtuvo una reducción en la cantidad de perfiles totales para cada campaña GEF como muestra la Tabla 3.1. Es importante destacar que del total de perfiles (221) alrededor del 44 % resultaron tener capa de mezcla. La Figura 3.2 muestra la ubicación de los perfiles para las campañas GEF 1, 2 y 3 (octubre, septiembre y marzo) respectivamente, haciendo una distinción entre perfiles que no presentan capa de mezcla (homogéneos) y los que sí tienen (no homogéneos).

En la campaña GEF 1 (octubre, Figura 3.2a) se puede observar que los perfiles sin capa de mezcla se encuentran cercanos a la costa, ya que allí las profundidades son menores que en plataforma media y externa, por lo que los procesos de mezcla debidos a la fricción de la marea con el fondo logran homogeneizar la columna de agua en su totalidad y *offshore* del frente de marea; la plataforma ya muestra estratificación primaveral (ver transecta con orientación NO-SE aproximadamente a 45°S de la Figura 3.2a). Siguiendo una transecta desde las costas de Puerto deseado (aprox. 48°S) Sabatini et al. (2012 [56]) utilizaron el parámetro de Simpson y discriminaron aguas completamente homogéneas cercanas a la costa (en octubre) y luego una leve estratificación en dirección hacia el este. Lo mismo encontró frente a las costas de Bahía Grande (aprox. 51°S). Los resultados en el presente trabajo, en base al criterio único (utilizando los mismos datos de GEF) dan coherentes con lo publicado por Sabatini et al. (2012 [56]) (Figura 3.2a).

Los perfiles no homogéneos (con capa de mezcla) en la región sur más profunda ( $z > 100$  m) entre la plataforma y el Banco Burwood (estaciones GEF 1: 60, 61 y 63-65, Figura 2.1) se destacan por diferenciarse de las regiones de plataforma que aún para octubre continúan mezcladas. Estas estaciones muestran en superficie aguas más cálidas (aproximadamente 1°C mayor) y más diluidas (ya que la salinidad en superficie es, aproximadamente, 0.3 ups menor que a 200 m, donde la señal de agua subantártica de la corriente de Malvinas aparece). Podría tratarse del inicio de la estratificación primaveral en la región donde la mezcla por marea no tiene influencia debido a las mayores profundidades. Algo similar ocurre en el verano en la zona estratificada del frente de Patagonia Austral, como lo muestran los resultados de marzo (GEF 2) en la misma región (símbolos rosas, estaciones homogéneas en la zona costera, Figura 3.2b) debido a la influencia de aguas de plataforma con baja salinidad relativa por mezcla con las aguas que ingresan por el estrecho de *Le Maire*. Aunque en GEF 3 (septiembre) no se repite ninguna de las transectas que atraviesan la zona profunda entre plataforma y el

Banco Burwood, las estaciones más cercanas al talud a 52,5°S y 55°S (círculos celestes en la Figura 3.2c) muestran el mismo patrón en septiembre que en octubre (Figura 3.1, estaciones 59, 60 y 61).



**Figura 3.1: Gráfico de los perfiles verticales de T, S y  $\sigma_\theta$  de las estaciones 59, 60 y 61 de octubre.** Se observa la columna homogénea en la estación 59 (prof. <200 m) vs. los perfiles no homogéneos con capa de mezcla de las estaciones profundas 60 y 61. Mapa extraído del Informe Técnico para GEF 1. [46]

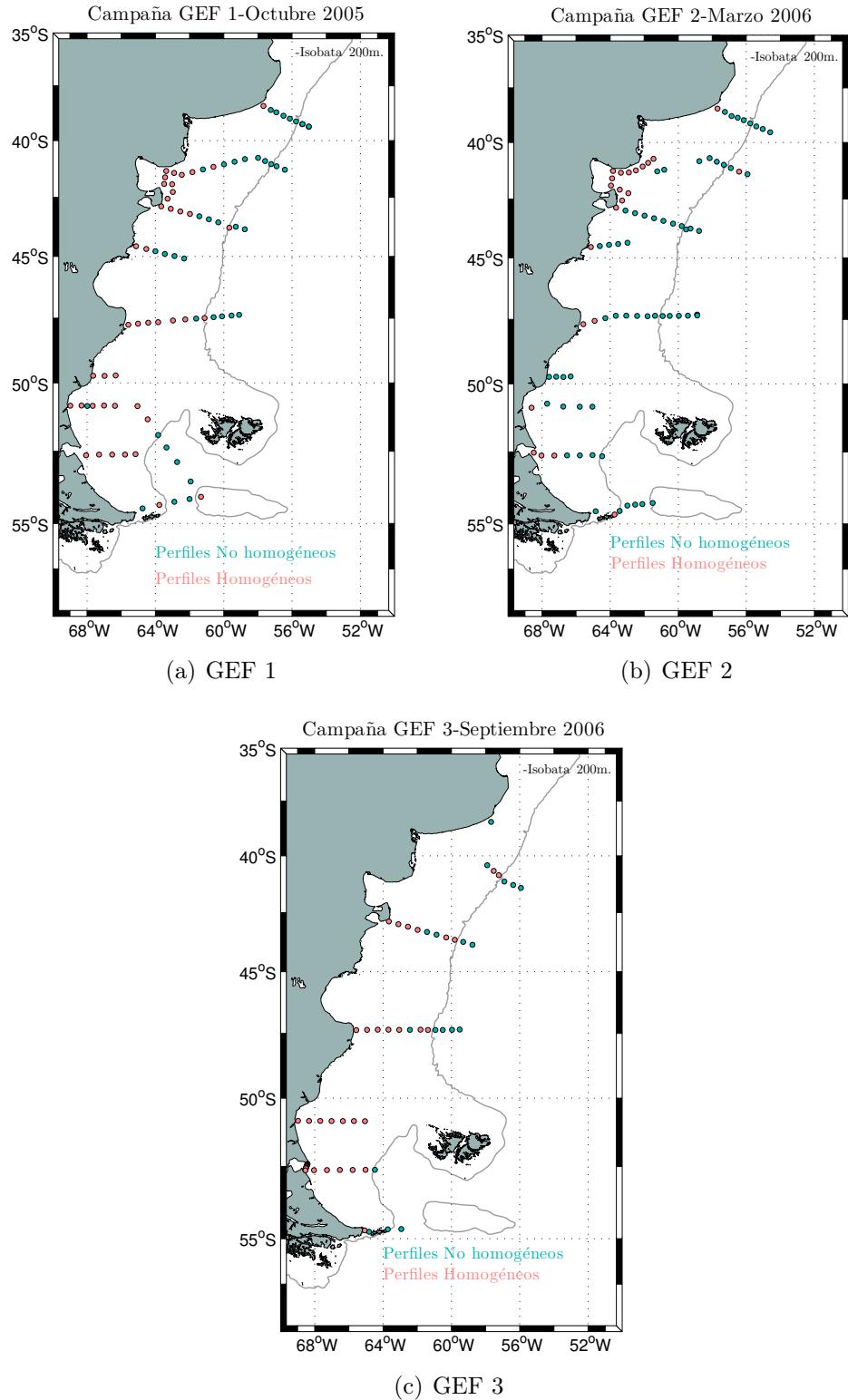
Sabatini et al. (2012 [56]) discuten esta región en detalle, sus figuras 3 y 4 (masas de agua y estratificación con influencia diferencial entre temperatura y salinidad [56]) permiten notar que los resultados obtenidos en el presente trabajo marcan claramente la diferencia en las condiciones de estratificación de la columna de agua. La figura 4 de Sabatini et al. (2012 [56]) cuantifica los efectos de la temperatura y salinidad en la formación de la estratificación. Los resultados del presente trabajo permiten, además, obtener la PCM.

Otro patrón de estratificación diferencial durante octubre (GEF 1) lo marca el único perfil no homogéneo (círculo celeste en la Figura 3.2 a; estación 73, Figura 3.1) en la región más costera (aproximadamente en la transecta de 51°S). En esos sitios la influencia de la baja salinidad en la densidad produce la identificación de una capa de mezcla a través de esta metodología. Lo interesante de los resultados encontrados en el presente trabajo es que, aún con baja influencia de la temperatura en los perfiles o de la presencia de aguas de baja salinidad en esta región de la parte más austral del frente del talud continental (Sabatini et al., 2012 [56]), este criterio único permite identificar los perfiles homogéneos y no homogéneos en toda la región de la plataforma Patagónica y comparar regiones con distintas PCM para caracterizar toda el área. En la sección 3.3 se discute la presencia de una floración extraordinaria de fitoplancton exactamente en dicha estación (estación 73, Figura 3.1).

Por otro lado, en GEF 2 (marzo, Figura 3.2b) sólo se observan perfiles homogéneos (sin capa de mezcla) en regiones costeras (círculos rosas) por tratarse del final del verano, la estratificación se intensifica en la zona *offshore* de los frentes de marea costeros aumentando el número de perfiles que cuentan con capa de mezcla en toda la plataforma. En cambio, durante GEF 3 (septiembre, Figura 3.2c) toda la plataforma es verticalmente homogénea salvo por pocos perfiles con capa de mezcla (identificadas con el criterio único) ubicados llamarativamente fuera de la isobata de 200 m (zona profunda donde el calentamiento del inicio de la primavera en aguas offshore del talud parece tener un leve efecto positivo vs. la mezcla por marea que ocurre en la plataforma).

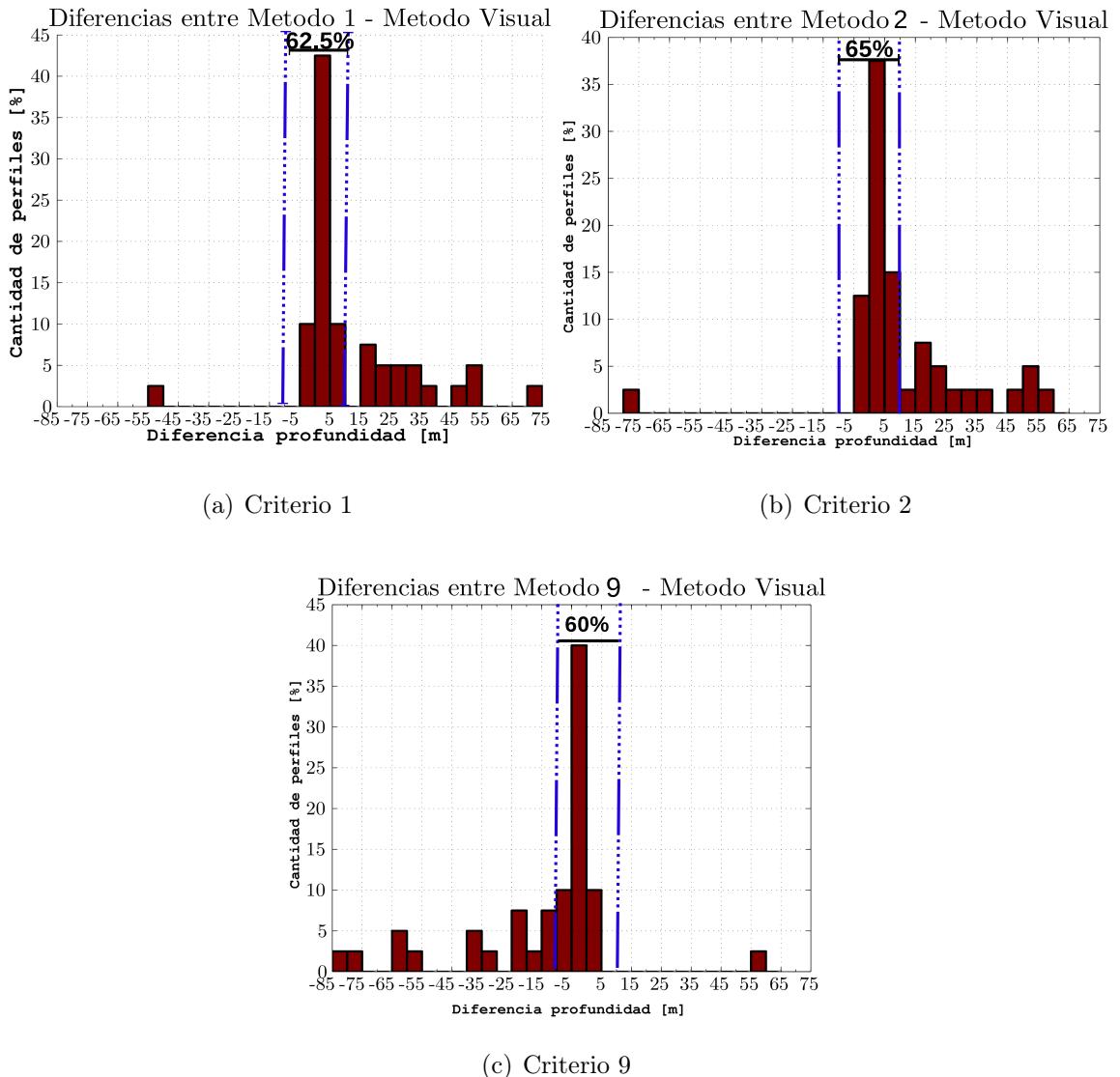
Campaña	Perfiles totales	Perfiles con capa de mezcla	Perfiles sin capa de mezcla
GEF 1 (octubre)	82	40	42
GEF 2 (marzo)	83	60	23
GEF 3 (septiembre)	56	22	34
GEF 1, 2 y 3	221	122	99

**Tabla 3.1: Cantidad de perfiles.** Se muestran los valores totales y los restantes luego de aplicar el criterio para separar aquellos perfiles sin capa de mezcla de los que sí cuentan con ella.

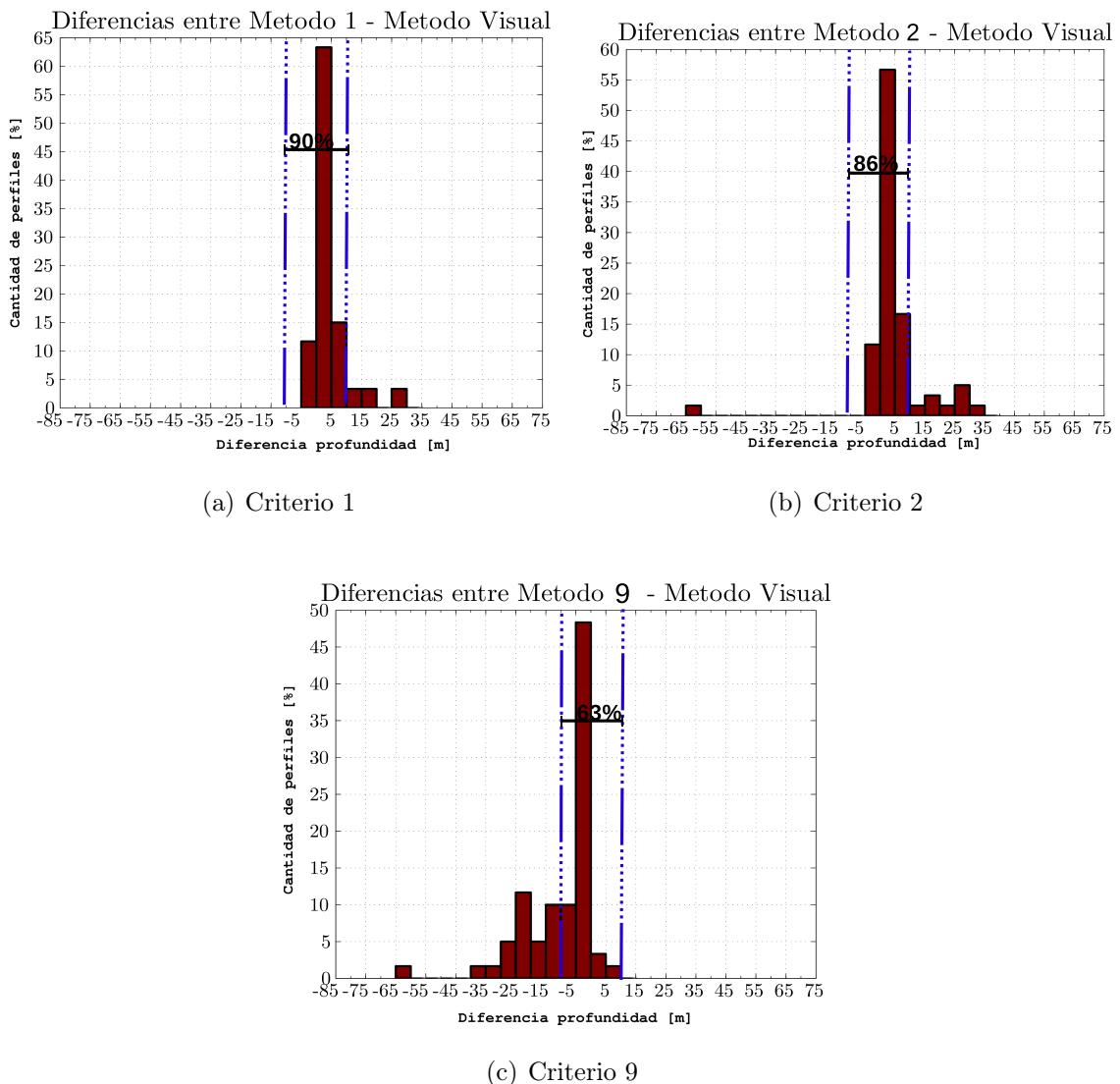


**Figura 3.2: Posición de las estaciones hidrográficas durante las campañas GEF.** Se muestran identificadas en círculos de colores las estaciones que resultaron no presentar capa de mezcla (color rosa) y las que sí la tienen (color celeste) según el criterio que se definió en la Ecuación 2.2.

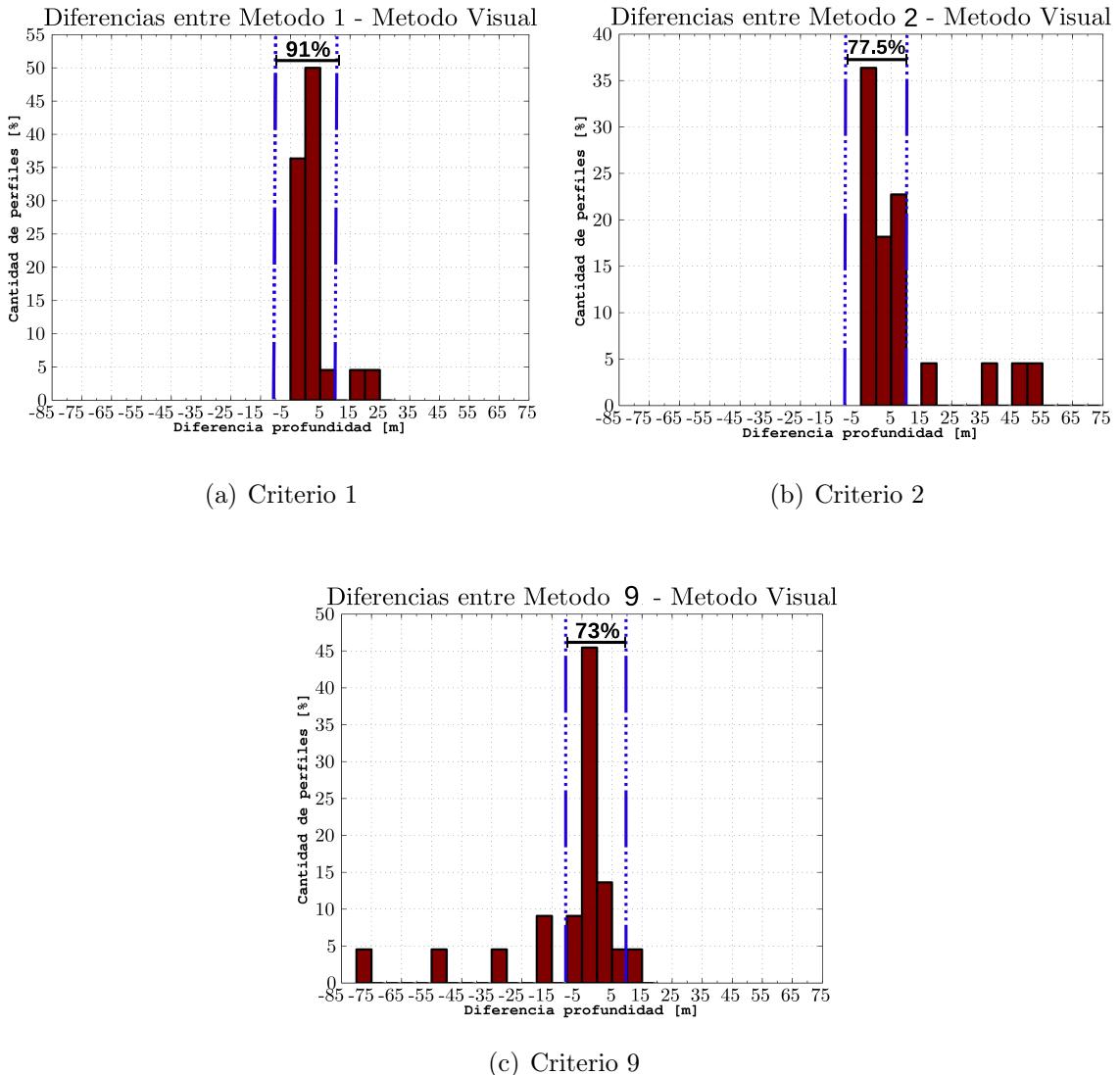
A modo de ejemplo se muestran solo algunos de los histogramas realizados para analizar las diferencias entre PCM estimada con los distintos criterios y la PCMV. Las Figuras 3.3, 3.4 y 3.5 muestran los histogramas correspondientes a los criterios 1, 2 y 9 para las campañas GEF 1, 2 y 3 respectivamente. Dichos casos de estudio son los que resultaron tener mayor porcentaje de perfiles con diferencias (en valor absoluto) menores a 10 m. En cada una de las figuras se delimita el intervalo [-10, 10] m (línea punteada azul) y en negro el porcentaje de perfiles totales que presentan diferencias que caen en ese rango. Dichos criterios cuentan con valores mayores que el 62 % y, el Criterio 1 es el que cuenta con los mayores porcentajes para dos de las tres campañas.



**Figura 3.3: Resultados obtenidos para los perfiles que cuentan con capa de mezcla de GEF 1.** Se muestran los histogramas porcentuales [%] resultantes para la diferencia entre la PCM obtenida con la estimación visual y la PCM obtenida con el Criterio 1, 2 y 9 respectivamente. En líneas punteadas se marca el intervalo correspondiente a una diferencia entre [-10, 10] metros y se encuentra indicado el porcentaje de perfiles que cuenta con una diferencia comprendida en el respectivo intervalo.



**Figura 3.4: Resultados obtenidos para los perfiles que cuentan con capa de mezcla de GEF 2.** Se muestran los histogramas porcentuales [%] resultantes para la diferencia entre la PCM obtenida con la estimación visual y la PCM obtenida con el Criterio 1, 2 y 9 respectivamente. En líneas punteadas se marca el intervalo correspondiente a una diferencia entre [-10, 10] metros y se encuentra indicado el porcentaje de perfiles que cuenta con una diferencia comprendida en el respectivo intervalo.



**Figura 3.5: Resultados obtenidos para los perfiles que cuentan con capa de mezcla de GEF 3.** Se muestran los histogramas porcentuales [%] resultantes para la diferencia entre la PCM obtenida con la estimación visual y la PCM obtenida con el Criterio 1, 2 y 9 respectivamente. En líneas punteadas se marca el intervalo correspondiente a una diferencia entre [-10, 10] metros y se encuentra indicado el porcentaje de perfiles que cuenta con una diferencia comprendida en el respectivo intervalo.

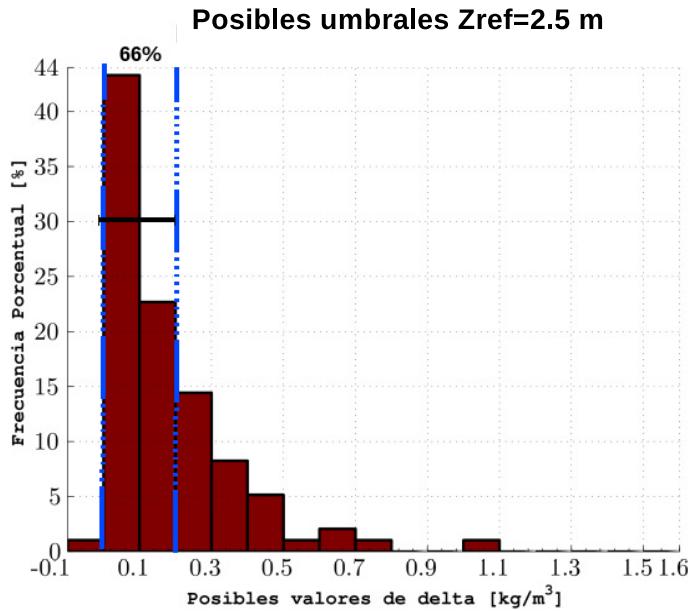
En la Tabla 3.2 puede observarse que los criterios 1, 2 y 5 son los que presentan valores más altos de correlación significativa. Los criterios 4 y 6 también presentan valores significativos de correlación para las tres campañas pero más bajos que los ya mencionados. El criterio 9 presenta valores altos de correlación sólo para dos de las campañas GEF. El resto de los criterios no resultan ser significativos para las tres campañas a la vez. Cabe destacar, que la cantidad de criterios que cuentan con valores significativos de correlación lineal aumentan para GEF 2. La inspección visual de los perfiles indica que esto se debe a que la campaña GEF 2 tiene mayor cantidad de perfiles con una PCM bien definida (perfil no homogéneo),

por lo que la mayoría de los criterios estiman la PCM en la misma zona. Teniendo en cuenta la cantidad de datos para cada una de las campañas, la significancia de los coeficientes de determinación ( $R^2$ ) fue testeada utilizando un test de Student (a dos colas con un 99 % de confianza). Del análisis anterior, se llegó a la conclusión de que los umbrales y profundidades de referencia de los criterios que utilizan esos parámetros no son adecuados para la región de estudio. Con el fin de comprobar si los resultados ya obtenidos podrían mejorarse buscando nuevos valores para estos parámetros, se realizó un ajuste de esos valores para plataforma Patagónica.

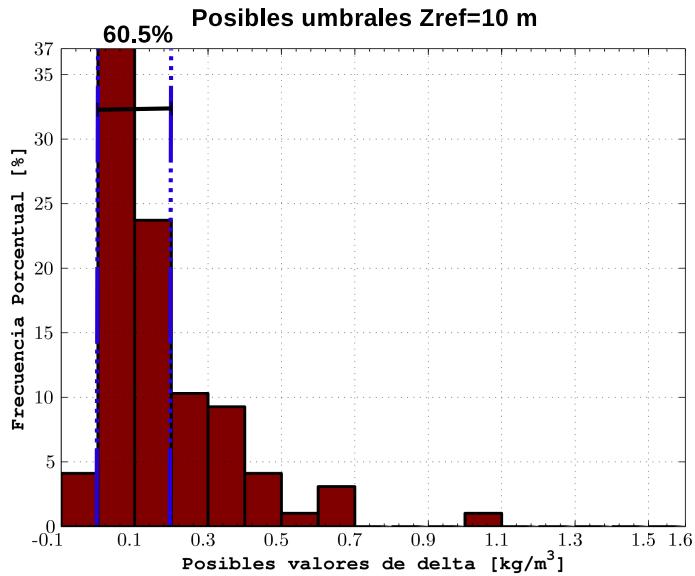
Número de criterio vs. Estimación visual	$R^2$		
	GEF 1	GEF 2	GEF 3
1	<b>0.63</b>	<b>0.91</b>	<b>0.98</b>
2	<b>0.51</b>	<b>0.60</b>	<b>0.71</b>
3	0.16	0.06	0.23
4	<b>0.39</b>	<b>0.23</b>	<b>0.45</b>
5	<b>0.50</b>	<b>0.69</b>	<b>0.59</b>
6	<b>0.18</b>	<b>0.57</b>	<b>0.67</b>
7	<b>0.23</b>	<b>0.56</b>	0.14
8	0.18	<b>0.52</b>	0.15
9	0.01	<b>0.62</b>	<b>0.76</b>
10	0.07	<b>0.15</b>	0.06
11	0.16	<b>0.30</b>	<b>0.38</b>

**Tabla 3.2: Regresiones lineales entre la PCM obtenida con los Criterios y la PCM obtenida con la estimación visual.** Se presentan en la tabla los valores del coeficiente de determinación ( $R^2$ ) para cada una de las regresiones. Los valores en negrita resultaron ser significativamente distintos de cero con un 99 % de confianza.

Mediante la metodología descripta en la Sección 2.2.1 para cada perfil de  $\sigma_\theta$  se obtuvo un posible valor de umbral. Repitiendo este procedimiento para todos los perfiles de  $\sigma_\theta$  de las campañas GEF y utilizando dos  $Z_{ref}$  posibles (2.5 m y 10 m) se realizó un histograma para cada uno de ellos como muestran las Figuras 3.6 y 3.7. Como puede observarse para ambas figuras, las mayores frecuencias se encuentran entre valores de (0 - 0.2)  $kg/m^3$ , por lo que se utilizó este intervalo para probar distintos valores de umbral. Ambas figuras presentan una gran similitud por lo que se infiere que utilizar 2.5 m ó 10 m como  $Z_{ref}$  no alteraría significativamente los resultados.



**Figura 3.6: Posibles valores de umbral para una  $Z_{ref} = 2.5 \text{ m}$**  Se muestra el histograma porcentual que contiene los posibles valores de umbral para una  $Z_{ref} = 2.5 \text{ m}$  según la Ecuación 2.4. En líneas punteadas azules se delimita el intervalo de valores con mayor frecuencia y se encuentra indicado el % total que representa.



**Figura 3.7: Posibles valores de umbral para una  $Z_{ref} = 10 \text{ m}$**  Se muestra el histograma porcentual que contiene los posibles valores de umbral para una  $Z_{ref} = 10 \text{ m}$  según la Ecuación 2.4. En líneas punteadas azules se delimita el intervalo de valores con mayor frecuencia y se encuentra indicado el % total que representa.

Posteriormente, se realizó una prueba para estimar la PCM con diferentes valores de umbral comprendidos entre (0 - 0.2)  $kg/m^3$  utilizando ambas  $Z_{ref}$  como muestra la Tabla 3.3. Para poder seleccionar un sólo valor de umbral y una sola  $Z_{ref}$  que sea representativa de la región se realizó una comparación entre los valores obtenidos de PCM con cada uno de estos posibles criterios y la PCMV a través de regresiones lineales. Los coeficientes de correlación ( $R$ ) se testearon utilizando un test de Student para analizar la significancia con un 99 % de confianza. Puede observarse que todos resultaron ser significativamente positivos (Tabla 3.4). Por lo tanto, el rango obtenido para los distintos posibles valores de umbral a través del histograma aporta valores que representan significativamente la región de estudio, y la  $Z_{ref}$  no modifica sustancialmente los resultados.

<b>Prueba</b>	<b>Umbral <math>\Delta\sigma_\theta [kg/m^3]</math></b>	<b>Profundidad de referencia <math>Z_{Ref.} [m]</math></b>
<b>1</b>	0.04	2.5
<b>2</b>	0.05	2.5
<b>3</b>	0.07	2.5
<b>4</b>	0.10	2.5
<b>5</b>	0.15	2.5
<b>6</b>	0.04	10
<b>7</b>	0.05	10
<b>8</b>	0.07	10
<b>9</b>	0.10	10
<b>10</b>	0.15	10

**Tabla 3.3:** Pruebas empleadas para encontrar un criterio que sea representativo de la región de estudio. Se muestran los valores de umbral y profundidades de referencia que se utilizaron para estimar la PCM.

Número de Prueba vs. Estimación visual	$R^2$		
	GEF 1	GEF 2	GEF 3
1	0.54	0.29	0.47
2	0.67	0.35	0.57
3	0.54	0.45	0.73
4	0.61	0.63	0.78
5	0.33	0.64	0.74
6	0.54	0.30	0.50
7	0.64	0.34	0.61
8	0.62	0.46	0.74
9	0.55	0.66	0.72
10	0.40	0.67	0.71

**Tabla 3.4:** Regresiones lineales entre la PCM obtenida con las pruebas descriptas en la Tabla 3.3 y la PCM obtenida con la estimación visual. Se presentan en la tabla los valores del coeficiente de determinación ( $R^2$ ) para cada una de las regresiones. Los valores en negrita resultaron ser significativamente distintos de cero con un 99 % de confianza.

Para tener más detalle sobre la eficacia de cada prueba se evaluó cuál de todas presenta mayor porcentaje de perfiles en los cuales la PCM obtenida y la PCMV difieren menos de 10 m. Considerando las tres campañas GEF (con un total de 122 perfiles verticales de  $\sigma_\theta$  con capa de mezcla) se obtuvo que las Pruebas 2, 3, 4, 7, 8 y 9 presentan porcentajes mayores al 70 % (Tabla 3.5). Sin embargo, todos presentan porcentajes mayores al 59 % lo que sugiere que todas las pruebas son aptas para describir un nuevo criterio que estime la PCM en la región de estudio.

Número de Prueba	% diferencia <10 m			
	GEF 1	GEF 2	GEF 3	TOTAL
1	70.0	53.3	77.3	63.1
2	80.0	60.0	81.8	70.5
3	75.0	73.3	72.7	73.8
4	70.0	81.7	59.1	73.8
5	32.5	85.0	40.9	59.8
6	72.5	61.7	81.8	68.9
7	80.0	70.0	77.3	74.6
8	75.0	78.3	54.5	73.0
9	65.0	85.0	63.6	74.6
10	30.0	88.3	36.4	60.7

**Tabla 3.5:** % de perfiles verticales de  $\sigma_\theta$  que al estimar la PCM con los criterios provistos por la Tabla 3.3 difieren (en valor absoluto) <10 m respecto a la PCM estimada visualmente. Se tuvo en cuenta que la campaña GEF 1 contiene 40 perfiles con capa de mezcla, GEF 2 contiene 60 y GEF 3 contiene 22, de manera tal que tiene un total de 122 perfiles verticales de  $\sigma_\theta$  con presencia de capa de mezcla.

### 3.1.1. Calibración y validación del criterio único para toda el área y época del año

Para poder seleccionar un único criterio, se realizó la calibración (ver Sección 2.2.2) de las Pruebas 2, 3, 4, 7, 8, 9 y el Criterio 1 para perfiles de  $\sigma_\theta$  seleccionados de forma aleatoria de la base de datos descripta en la Sección 2.1.2. La elección de los criterios se hizo acorde a los que presentaron mayores valores de correlación con la PCMV en las campañas GEF y más del 70 % de sus casos difieren (en valor absoluto) en menos de 10 m respecto de la PCMV. Se realizaron regresiones lineales entre los valores de PCMV y los obtenidos con dichos criterios como muestra la Tabla 3.6. Puede observarse que todos resultaron significativos y que las pruebas 7, 8 y 9 presentaron valores de  $R^2$  del orden de 0.8. Dichas pruebas tienen como  $Z_{ref}$  a 10 m y difieren entre sí en el valor de umbral. Un bajo (o alto) valor de  $\Delta\sigma_\theta$  puede subestimar (o sobreestimar) el valor de la PCM, por lo tanto se seleccionó a la Prueba 8 como el criterio único para estimar la PCM en el área de estudio, ya que de las tres pruebas la numero 8 es la que presentó mayor  $R^2$  y valor de umbral intermedio respecto a los otros dos ( $\Delta\sigma_\theta = 0.07 \text{ kg/m}^3$ ).

Número de criterio vs. Estimación visual	$R^2$
1	<b>0.54</b>
2	<b>0.54</b>
3	<b>0.75</b>
4	<b>0.76</b>
5	<b>0.73</b>
6	<b>0.84</b>
7	<b>0.85</b>
8	<b>0.84</b>

**Tabla 3.6:** Regresiones lineales entre la PCM obtenida con los criterios y la PCM obtenida con la estimación visual para las 30 estaciones seleccionadas de manera aleatoria de la base de datos descripta en la Sección 2.1.2 para los meses de marzo, septiembre y octubre. Se presentan en la tabla los valores del coeficiente de determinación ( $R^2$ ) para cada una de las regresiones. Los valores en negrita resultaron ser significativamente distintos de cero con un 99 % de confianza.

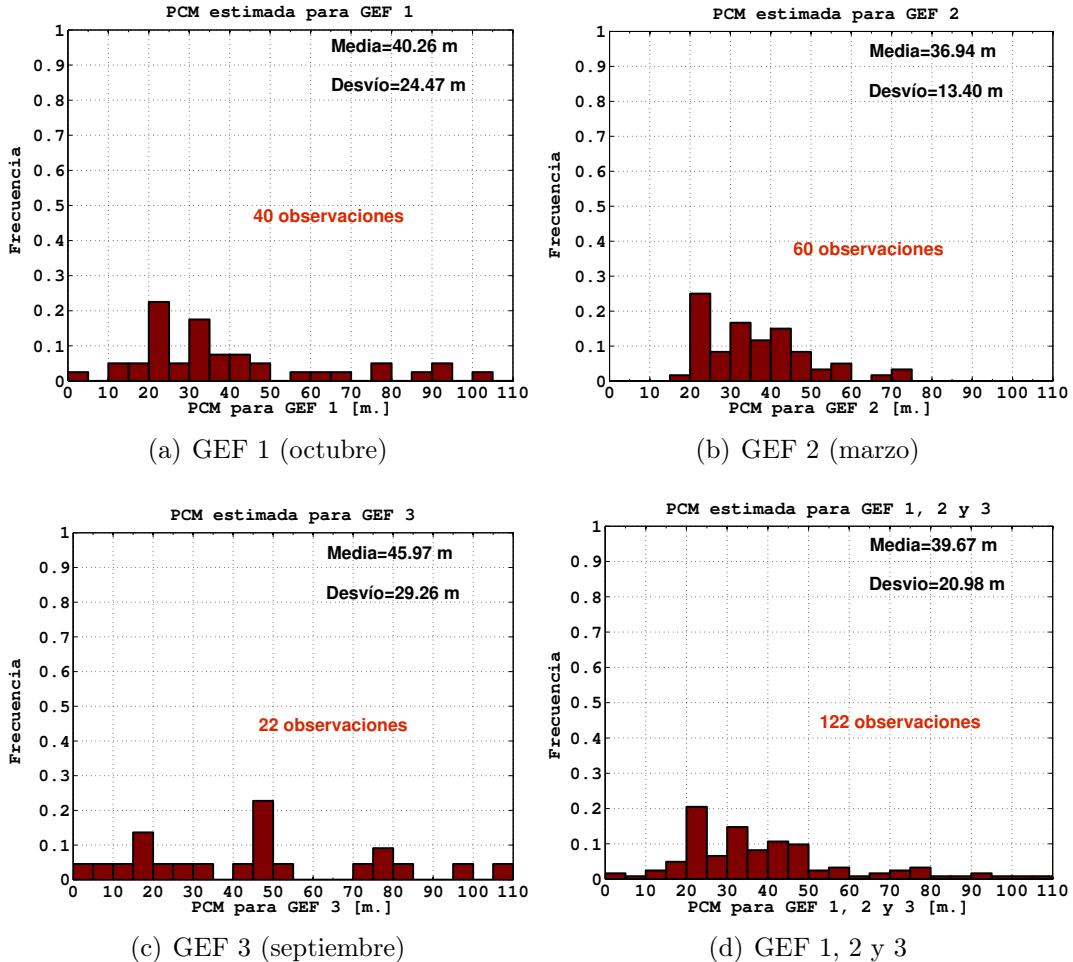
Finalmente, para validar a la Prueba 8 como único criterio para estimar la PCM en la región de estudio en cualquier época del año, se realizó una validación para los meses de enero, mayo y julio, característicos de verano, otoño e invierno (Sección 2.2.2).

En la Tabla 3.7 se muestran los valores del  $R^2$  para las regresiones lineales entre la PCMV y la PCM estimada con el único criterio para los 5 perfiles de enero, mayo y julio. Se muestran los valores para cada mes en particular, y considerando los 15 perfiles juntos. Puede observarse que todos resultaron ser significativos (test de Student con un 99 % de confianza) y con valores por encima de 0.9. Por lo tanto, el criterio seleccionado es representativo de todo el año, a pesar de ser elegido utilizando sólo los meses de primavera (septiembre y octubre) y marzo.

Número de Prueba vs. Estimación visual	$R^2$			
	enero	mayo	julio	enero, mayo y julio
Prueba 8 vs. Estimación visual	<b>0.93</b>	<b>0.96</b>	<b>0.99</b>	<b>0.98</b>

**Tabla 3.7:** Regresiones lineales entre la PCM obtenida con la Prueba 7 y la PCMV para 15 estaciones seleccionadas de manera aleatoria de la base de datos descripta en la Sección 2.1.2 para los meses de enero, mayo y julio. Se presentan en la tabla los valores del coeficiente de determinación ( $R^2$ ) para cada una de las regresiones considerando cada mes por separado (5 datos para cada uno) y los tres meses juntos (15 datos en total). Los valores en negrita resultaron ser significativamente distintos de cero con un 99 % de confianza.

La Figura 3.8 muestra los histogramas correspondientes para el valor de la PCM de la campaña GEF 1 (a), GEF 2 (b), GEF 3 (c) y ambas tres en conjunto (d).



**Figura 3.8: Histogramas de la PCM para GEF 1 (a), GEF 2 (b), GEF 3 (c) y las tres campañas juntas (d).** En todos los casos se muestra la cantidad de datos (observaciones) utilizados, el valor medio y el desvío estándar de la variable.

Segura et al. (2013 [60]) estimó la PCM utilizando el criterio de Brainerd y Greg et al. (1995 [11]) para las tres campañas GEF y obtuvo valores entre 2-135 m, lo cual es coincidente con lo obtenido en este trabajo (Figura 3.8d). En su trabajo, sin embargo, no realizó una caracterización espacial ni temporal de la PCM, ni una validación del método para toda época y región del área de estudio. Esto es importante, ya que el presente trabajo demuestra que no cualquier método es apto para estimar la PCM en el área de estudio.

### 3.2. Mapas estacionales de PCM

La Tabla 3.8 muestra la cantidad de perfiles obtenidos luego de cada uno de los filtros para los datos de la Sección 2.1.2. Puede observarse que al aplicar el primer filtro la cantidad de perfiles obtenidos se reduce drásticamente, esto se debe a que mucho de los datos provienen

de botellas y, por lo tanto, tienen baja resolución vertical. La mayor cantidad de perfiles con buena resolución en la vertical se encuentran en primavera y verano ya que las campañas oceanográficas tienen un sesgo hacia estas estaciones. También en primavera y verano ocurren los mayores porcentajes de perfiles no homogéneos con presencia de capa de mezcla puesto que el calentamiento primaveral intensifica la estratificación y comienza a formarse la capa de mezcla estacional que se intenta identificar en el presente trabajo.

Para el invierno y el otoño se observa que hay un gran porcentaje de perfiles que cumplen con la resolución vertical pero no presentan estratificación (Tabla 3.8). Estas son condiciones típicas de latitudes medias templadas. En invierno la mezcla turbulenta debida al viento es mayor y el océano pierde calor por lo que la temperatura superficial disminuye y la columna de agua es verticalmente homogénea. El otoño es una estación de transición en la que la plataforma continúa enfriándose desde el verano. Krepper y Bianchi (1982 <sup>32</sup>), y los resultados de Martinez (2005 <sup>40</sup>) describen que el calentamiento se produce abruptamente durante el pasaje de primavera a verano, mientras que el enfriamiento de verano a otoño y de otoño a invierno, es más uniforme y prolongado.

Estación	Cantidad de perfiles totales	Cantidad de perfiles luego del filtro (%)	Cantidad de perfiles con capa de mezcla (%)
invierno	2187	465 (21.3 %)	158 (7.2 %)
primavera	1984	743 (37.4 %)	416 (21.0 %)
verano	2785	979 (35.2 %)	881 (31.6 %)
otoño	1941	465 (24.0 %)	304 (15.7 %)

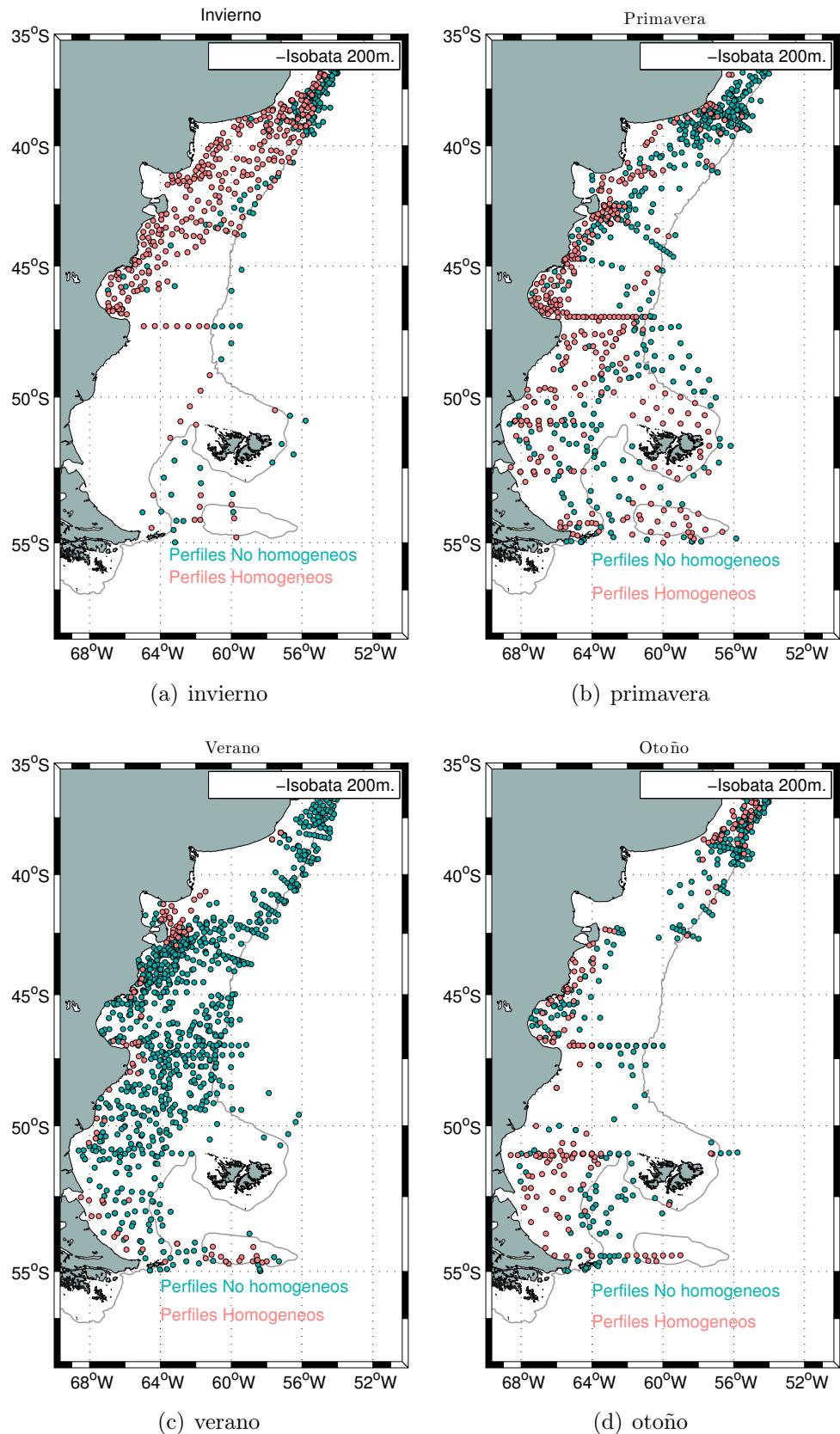
**Tabla 3.8: Cantidad de perfiles totales y parciales luego de aplicar diversos filtros sobre las bases de datos estacionales.** En la primer columna se muestra la cantidad de perfiles totales de la base de datos para cada estación. En la segunda, se muestra la cantidad total y porcentual (respecto del total) resultante luego de aplicar un filtro que permite retener sólo aquellos perfiles que contengan 30 o más datos en los primeros 100 m. Por último, en la tercera columna se muestra la cantidad total y porcentual (respecto del total) de los perfiles que resultaron tener capa de mezcla luego de aplicar el filtro anterior.

La Figura 3.9 muestra la distribución geográfica de los perfiles con y sin capa de mezcla para invierno (a), primavera (b), verano (c) y otoño (d), respectivamente mediante la metodología empleada en la Sección 2.2.3. El análisis de estos resultados en combinación con los del espesor de la capa de mezcla (PCM) se realiza más adelante luego de presentar los mapas estacionales de PCM (Figura 3.10).

En principio, se analiza únicamente la distribución de perfiles homogéneos y no homogéneos sobre el área de estudio. En invierno se puede observar que prácticamente todas las estaciones de plataforma ( $\text{prof} < 200 \text{ m}$ ) presentan perfiles homogéneos (sin capa de mezcla). El bajo porcentaje de perfiles con capa de mezcla se encuentra cerca de la isobata de 200 m, al norte de 40°S en la zona de plataforma exterior y talud y en la región profunda ( $\text{prof} > 200 \text{ m}$ ) entre el talud sur y el Banco Burwood. La falta de capa de mezcla en el invierno en toda

la región de plataforma es coherente con la teoría, la columna de agua está mezclada de superficie a fondo. La presencia de una capa de mezcla en la zona profunda se repite durante todo el año, sin embargo en la Figura 3.10 se observa que no se trata de una capa de 100 m invariable, sino que la PCM de estas zonas muestra variabilidad estacional diferente.

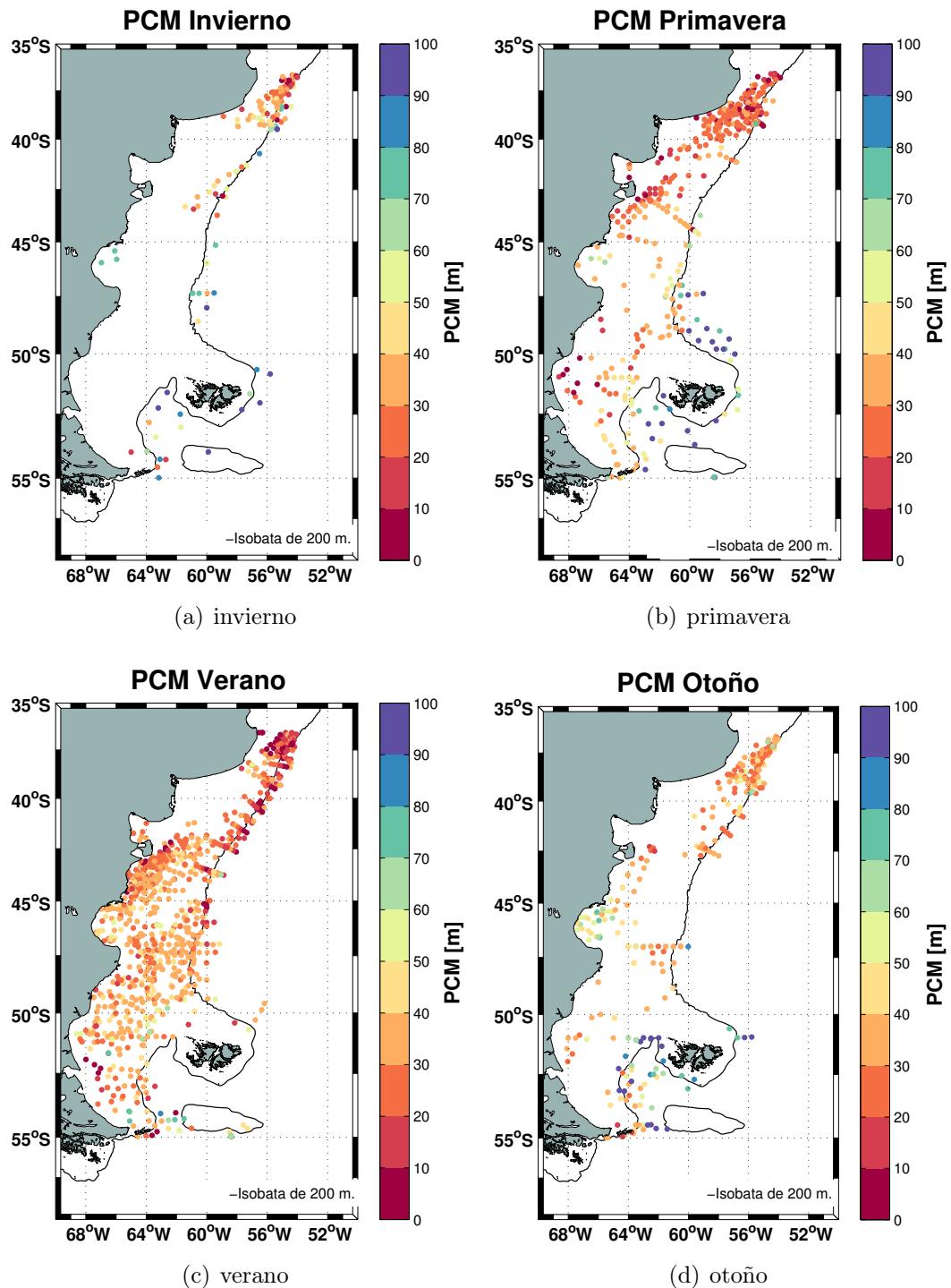
En otoño la mayor parte de los perfiles sin capa de mezcla se encuentran sobre la plataforma centro-sur y cerca de la costa. En verano prácticamente todos los perfiles son no homogéneos, es decir, con presencia de capa de mezcla. Sólo se encuentran perfiles homogéneos (mezclados de superficie a fondo) cerca de la costa (la parte mezclada de los frentes costeros de marea) y sobre el Banco Burwood. Las estaciones que se encontraron en plataforma, sin capa de mezcla (homogéneas) para el verano (Figura 3.9) coinciden con las regiones mezcladas determinadas en Bianchi et al. (2005 <sup>6</sup>) mediante el parámetro de Simpson. Se puede considerar que primavera y otoño son las estaciones de transición. Hay zonas que combinan perfiles de ambas clases.



**Figura 3.9:** Posición de los perfiles verticales de la base de datos para invierno (a), primavera (b), verano (c) y otoño (d). Se muestran identificadas en círculos de colores las estaciones que resultaron homogéneas (color rosa) y las que no (color celeste) según el criterio que se definió en la Ecuación 2.2.

La Figura 3.10 muestra los espesores de capa de mezcla (PCM) según la estación del año, resultantes de aplicar el criterio único obtenido con la metodología detallada en la Sección 2.2.1. La Figura 3.11 muestra las distribuciones horizontales estacionales (campos interpolados con Kriging) de la PCM.

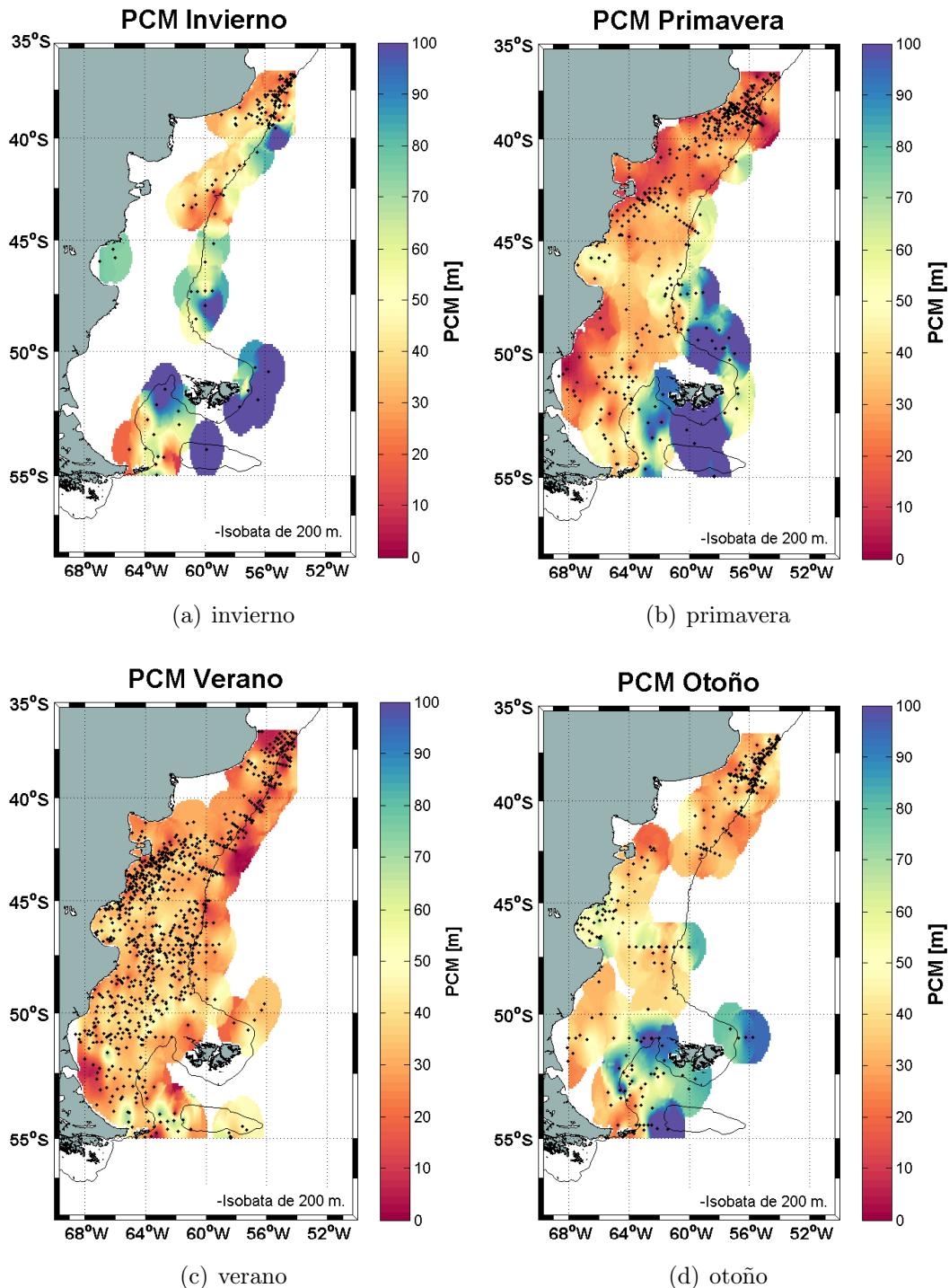
En la plataforma media y sur, pueden observarse valores más profundos en el invierno, y valores menos profundos a medida que avanza el calentamiento, esto es coherente con lo esperado ya que temperaturas más altas generan una capa de mezcla menos profunda, y el enfriamiento tiende a profundizarla. Durante el verano (Figura 3.10 y 3.11c) casi todos los perfiles no homogéneos de la región de estudio poseen una PCM quasi-homogénea con un valor promedio de 30 m, mientras que para el resto del año se puede destacar una diferencia en la columna de agua entre la región norte y sur del área de estudio, probablemente consecuencia a las diferencias térmicas (ej. amplitud térmica, valor medio) observadas entre el norte y el sur (ej. Podesta et al., 1991 [49]; Rivas, 2010 [53]; Kahl, 2012 [28]).



**Figura 3.10:** Valor estimado de la PCM (m) para invierno (a), primavera (b), verano (c) y otoño (d). Se utilizaron sólo los perfiles que presentan capa de mezcla del set de datos históricos descriptos en la Sección 2.1.2.

Los resultados obtenidos en el presente trabajo están de acuerdo con los registrados previamente en la bibliografía (Alvarez et al., 2016 [\[2\]](#); García et al., 2011 [\[21\]](#); de Boyer Montégut et al., 2004 [\[17\]](#)). García et al. (2011 [\[21\]](#)) analizaron los perfiles verticales de temperatura de

enero para la región comprendida entre  $47^{\circ}\text{S}$ - $51^{\circ}\text{S}$  y  $60^{\circ}\text{O}$ - $65^{\circ}\text{O}$  para el periodo diciembre 2007- enero 2008 (campañas PATEX con datos mayormente en el talud), encontrando una PCM del orden de los 30-35 m (ver Figura 2(b) de Garcia et al., 2011 [21]). Mientras que Alvarez et al. (2016 [2]) al validar su modelo para el mes de marzo con datos *in situ* encontró valores de PCM del orden de los 20-40 m (ver figura 3 de Alvarez et al., 2016 [2]) para dos estaciones ( $43.34^{\circ}\text{S}$ - $60.67^{\circ}\text{O}$  y  $43.44^{\circ}\text{S}$ - $60.87^{\circ}\text{O}$ ). de Boyer Montégut et al. (2004 [17]) obtuvieron para la región de estudio valores de PCM del orden de 20-40 m (Figura 1.6) para el verano y la primavera. Y para el invierno y otoño encontró, en el sur del área de estudio, valores entre los 80-100 m (Figura 1.6). A pesar de la baja resolución de los resultados publicados por de Boyer Montégut et al., estos parecen ser consistentes con los que se observan en las Figuras 3.10 y 3.11. Carreto et al. (2016 [14]) utilizó el criterio propuesto por de Boyer Montégut et al. (2004 [17]) para estimar la PCM en las transectas de GEF 1 a través del talud. Sin embargo, no realizó en su trabajo una validación del método global para utilizarlo en cualquier región ni época del año, como lo hace el presente trabajo.



**Figura 3.11:** Valor interpolado de la PCM (m) para invierno (a), primavera (b), verano (c) y otoño (d). Se utilizaron sólo los perfiles que presentan capa de mezcla del set de datos históricos descriptos en la Sección 2.1.2. En asteriscos negros se muestran los puntos que se utilizaron para interpolar los valores de PCM usando el método *Kriging*.

Blanc et al. (1983 [\[8\]](#)) relacionaron la SST con la PCM en dos regiones de la Plataforma (Figura [3.12](#) y [3.13](#)) para el periodo 1950-1980. Para comparar con sus resultados, se analizan

dos áreas similares: Área 1 y Área 2 (Tabla 3.9 y Figura 3.14). Para el Área 1 se puede destacar que los resultados obtenidos en el presente trabajo muestran valores medios de SST más bajos (aproximadamente 2°C) y las frecuencias de SST para invierno y primavera superan el máximo valor obtenido en Blanc et al. (1983 [8]) en aproximadamente 0,4°C (Figura 3.15).

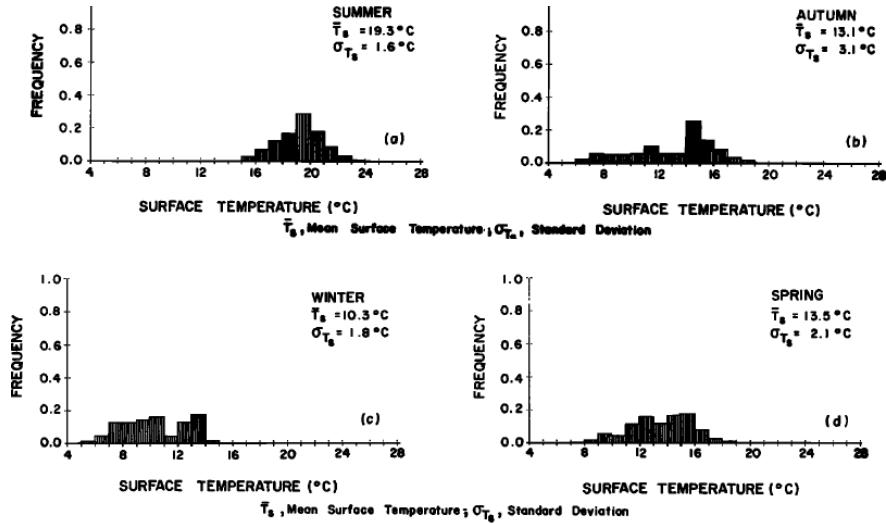


Figura 3.12: Histogramas de la SST para verano (a), otoño (b), invierno (c) y primavera (d) correspondientes al área comprendida entre 35°S-40°S y 50°O-55°O. En todos los casos se muestra la cantidad de datos (observaciones) utilizados, el valor medio y el desvío estándar de la variable. Extraído de Blanc et al. (1983 [8]).

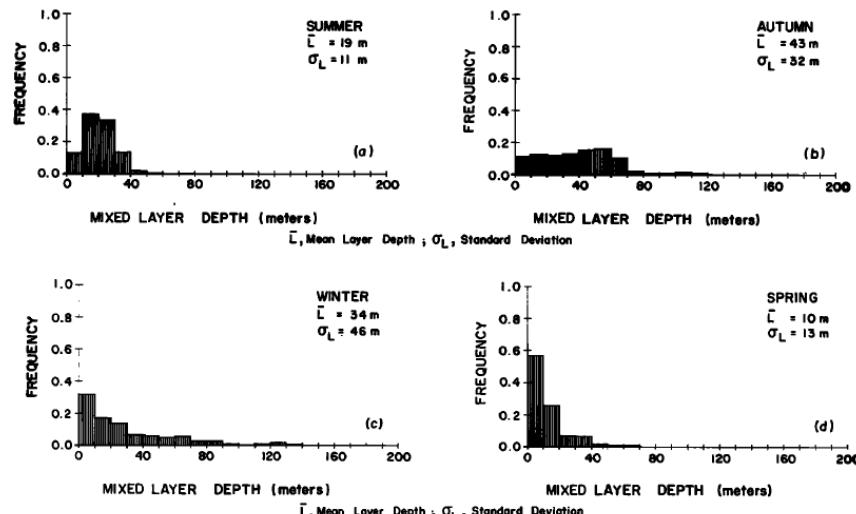
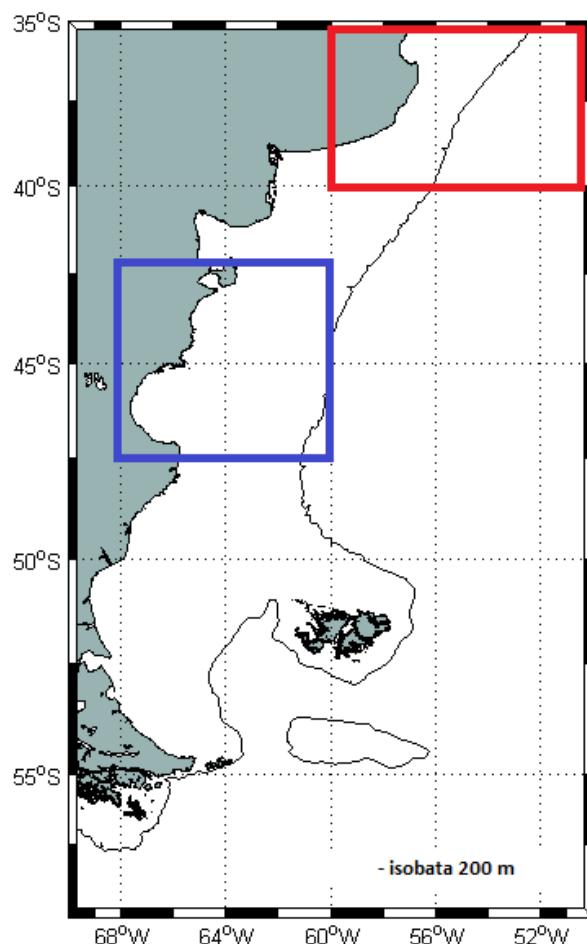


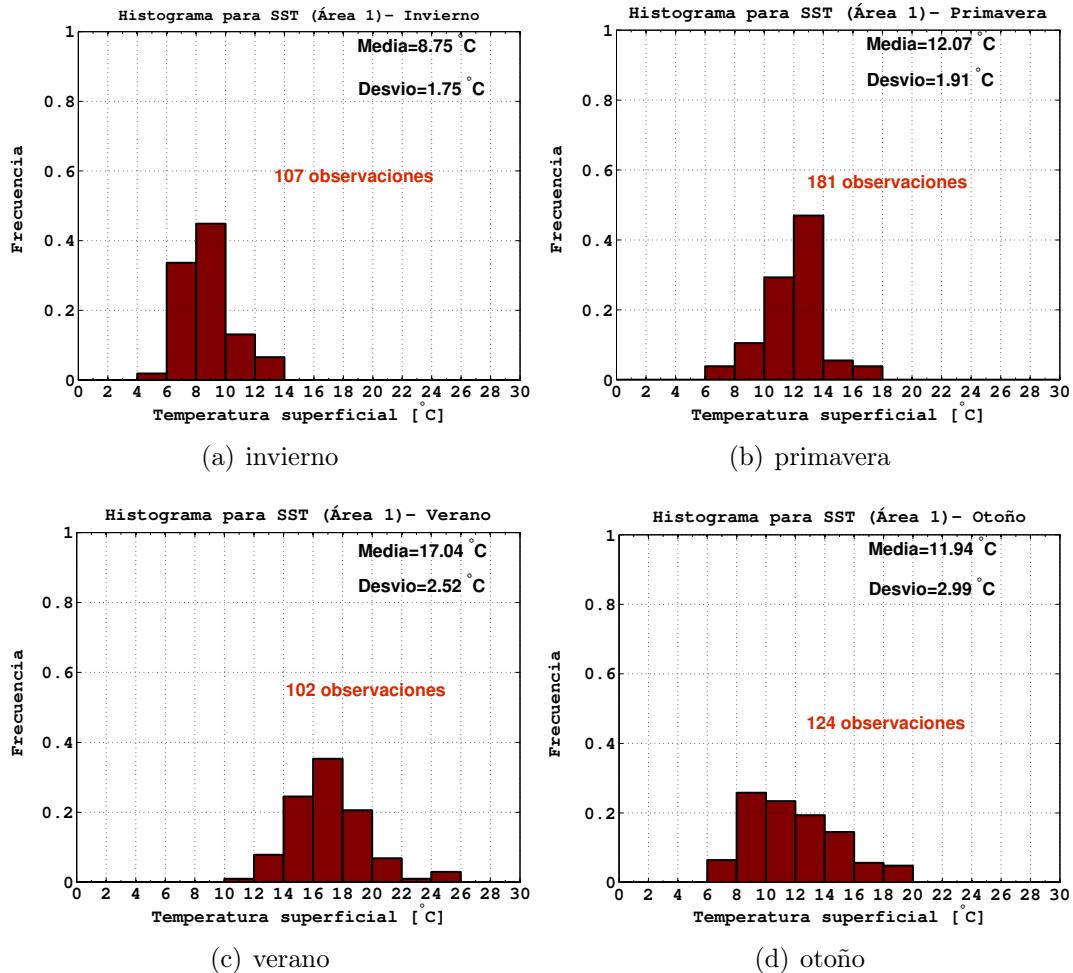
Figura 3.13: Histogramas de la PCM para verano (a), otoño (b), invierno (c) y primavera (d) correspondientes al área comprendida entre 35°S-40°S y 50°O-55°O. En todos los casos se muestra la cantidad de datos (observaciones) utilizados, el valor medio y el desvío estándar de la variable. Extraído de Blanc et al. (1983 [8]).

Estación	Área 1	Área 2
	(35-40) <sup>o</sup> S y (50-60) <sup>o</sup> O	(42-48) <sup>o</sup> S y (60-68) <sup>o</sup> O
invierno	107	13
primavera	181	82
verano	102	429
otoño	124	75

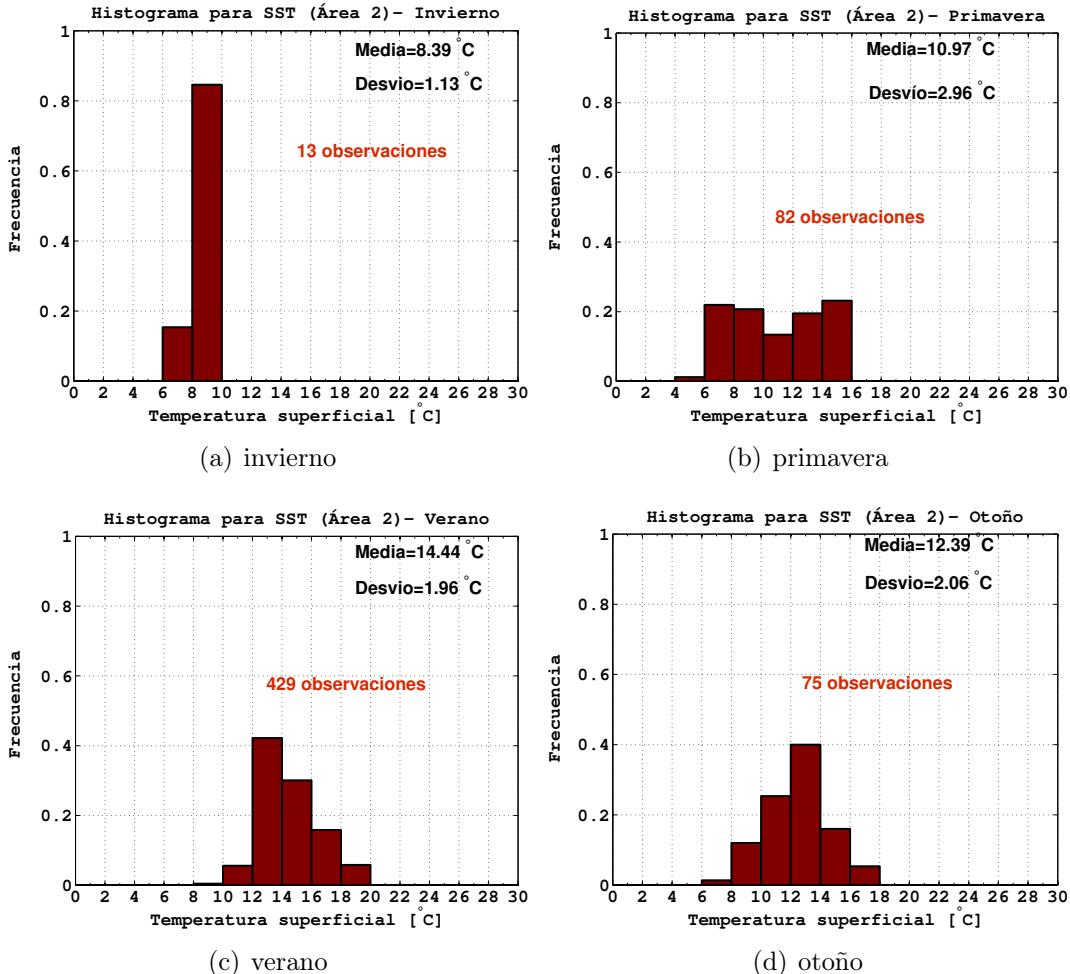
**Tabla 3.9:** Cantidad de perfiles verticales comprendidos en las Áreas 1 y 2. Se muestra la cantidad de mediciones en la columna de agua comprendidas en cada una de las regiones para las diferentes estaciones del año.



**Figura 3.14:** Mapa con la ubicación geográfica del Área 1 y 2. El Área 1 se encuentra comprendida entre (35 – 40)<sup>o</sup>S y (50 – 60)<sup>o</sup>O (rectángulo rojo) y el Área 2 entre (42 – 48)<sup>o</sup>S y (60 – 68)<sup>o</sup>O (rectángulo azul).



**Figura 3.15: Histogramas de la SST para invierno (a), primavera (b), verano (c) y otoño (d) correspondientes al Área 1.** En todos los casos se muestra la cantidad de datos (observaciones) utilizados, el valor medio y el desvío estándar de la variable.

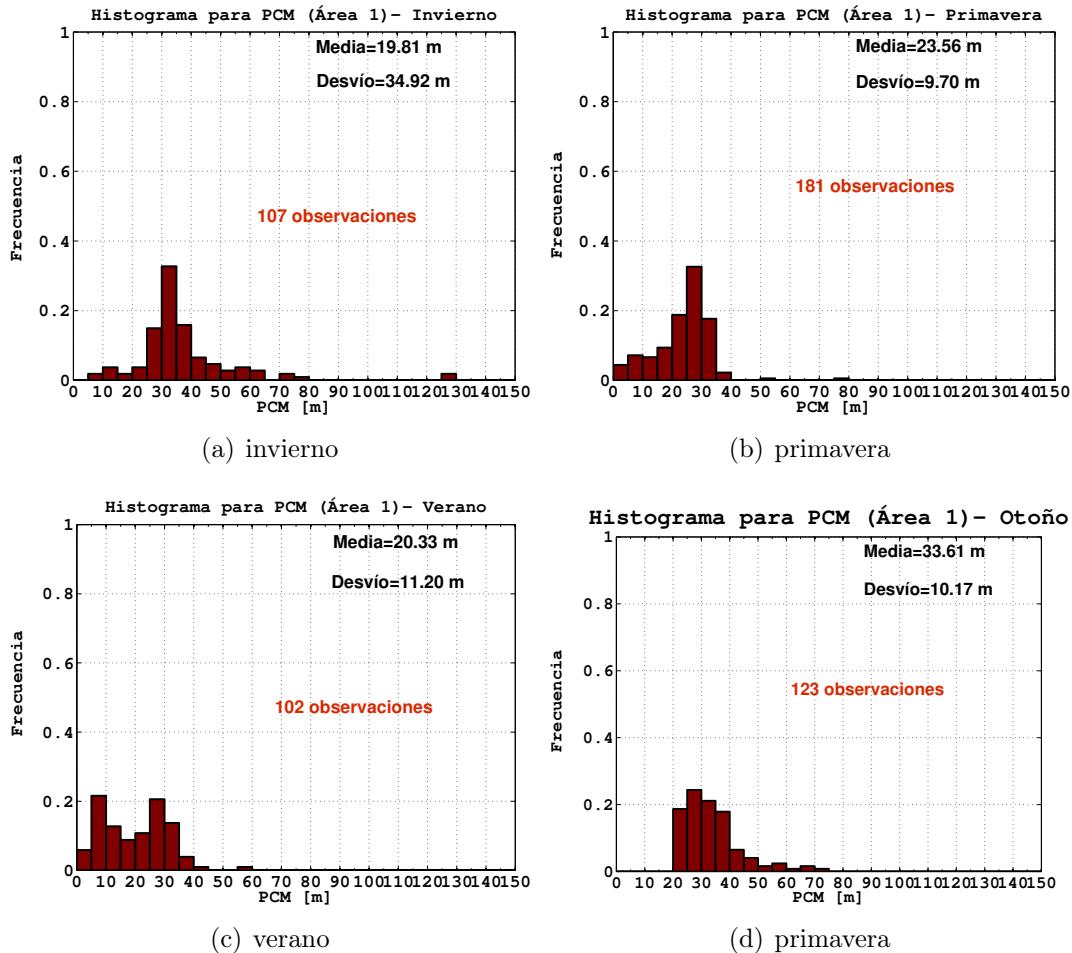


**Figura 3.16: Histogramas de la SST para invierno (a), primavera (b), verano (c) y otoño (d) correspondientes al Área 2.** En todos los casos se muestra la cantidad de datos (observaciones) utilizados, el valor medio y el desvío estándar de la variable.

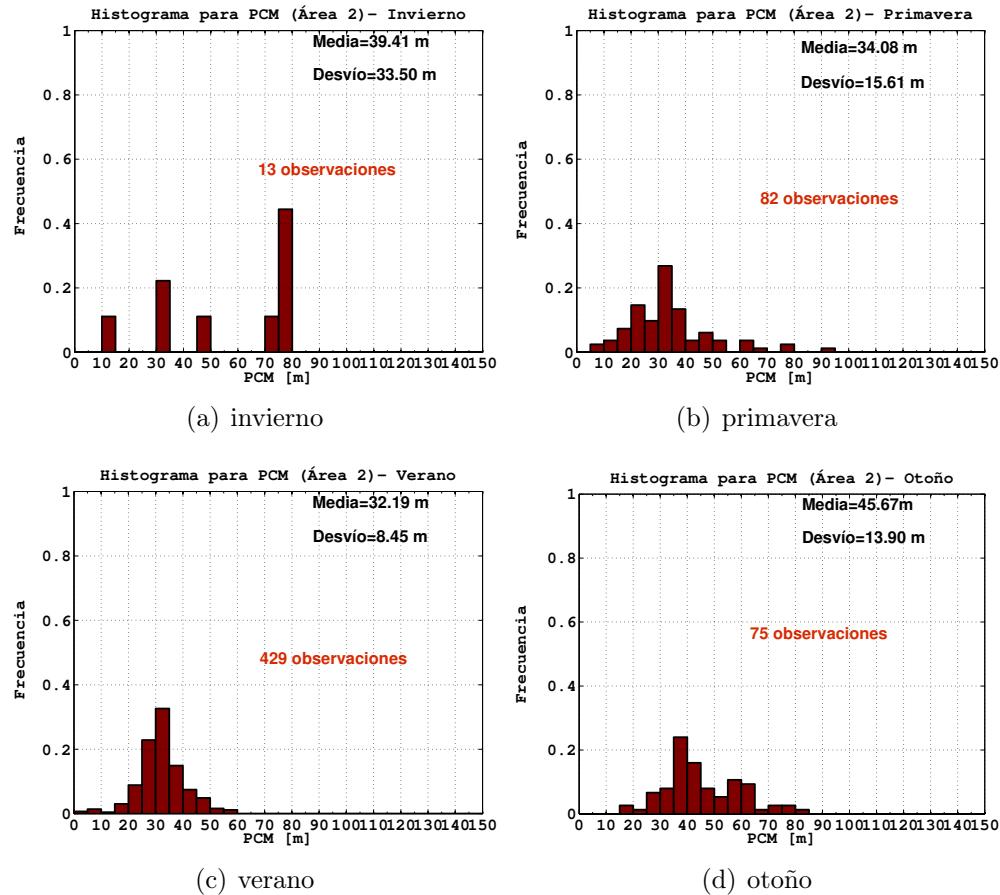
Para la PCM los valores encontrados en verano (media y desvío) por Blanc et al. (1983 [8](#)) son coincidentes con los de este trabajo (Figura [3.17c](#)). Para el resto de las estaciones se encuentran diferencias del orden de 10 m. En el caso del otoño e invierno los resultados del presente trabajo muestran espesores menores y para primavera mayores (o capas de mezcla más profundas). Sin embargo, el valor medio más alto de PCM fue encontrado en otoño para ambos trabajos. Las diferencias en los resultados puede deberse a que es distinto el periodo analizado en cada trabajo y es distinta la resolución vertical de los perfiles estudiados (en Blanc et al., 1983 [8](#) utilizan perfiles de XBT).

Se puede observar que el Área 2 (Figura [3.16](#)) tiene valores de SST más bajos que los del Área 1 (Figura [3.15](#)), lo cual es coherente con lo esperado ya que el Área 2 se encuentra más al sur y, por lo tanto, la incidencia solar y el contenido de calor recibido es menor. Algo similar ocurre con la PCM (Figura [3.17](#) y [3.18](#)), puesto que presenta valores más profundos en el Área 2, lo cual es concordante con lo obtenido anteriormente, temperaturas superficiales más frías pueden generar una PCM más profunda. Se intentó obtener una relación entre la SST y la PCM para cada una de las áreas y estaciones (ver Apéndice, sección [5.1.2](#)) pero no

se pudo obtener un patrón característico o distintivo entre estas dos variables.



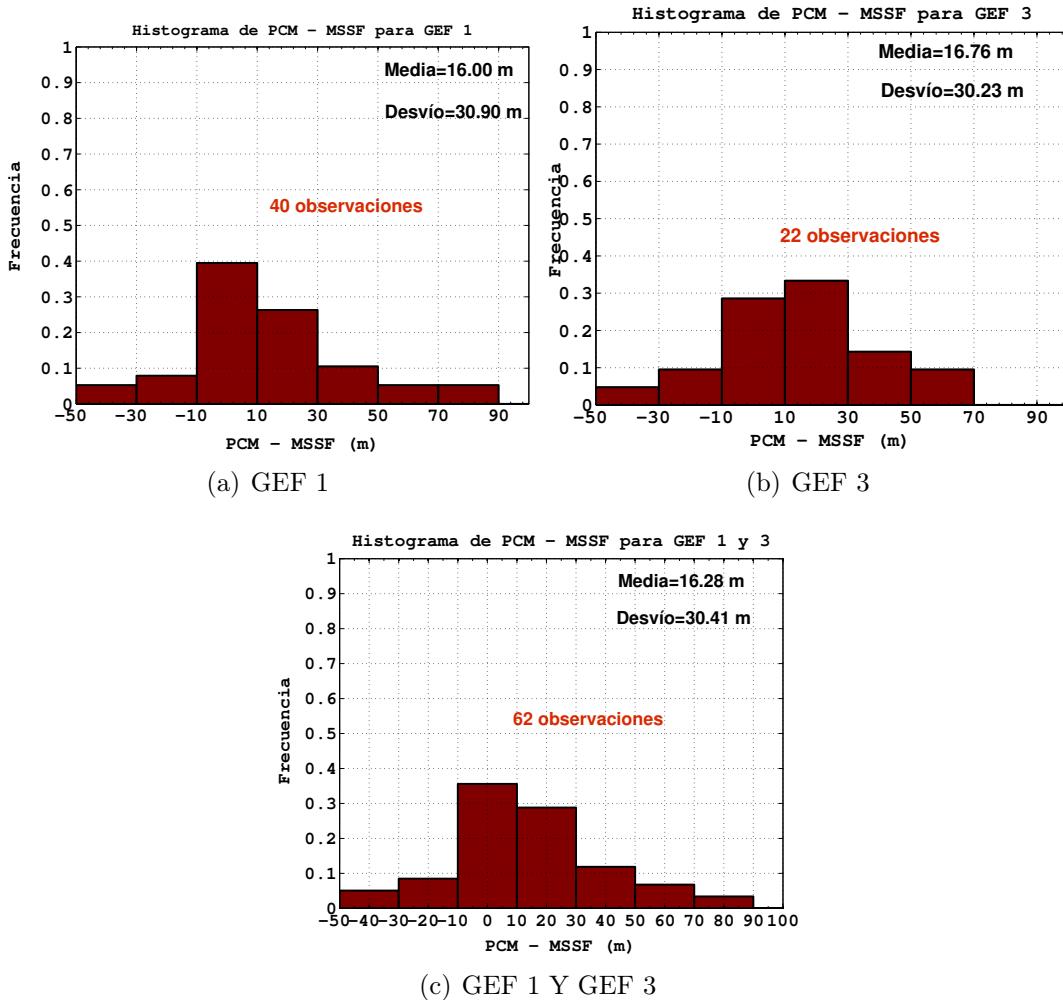
**Figura 3.17: Histogramas de la PCM para invierno (a), primavera (b), verano (c) y otoño (d) correspondientes al Área 1.** En todos los casos se muestra la cantidad de datos (observaciones) utilizados, el valor medio y el desvío estándar de la variable.



**Figura 3.18: Histogramas de la PCM para invierno (a), primavera (b), verano (c) y otoño (d) correspondientes al Área 2.** En todos los casos se muestra la cantidad de datos (observaciones) utilizados, el valor medio y el desvío estándar de la variable.

### 3.3. Relación entre la PCM y la profundidad del máximo sub-superficial de fluorescencia

La Figura 3.19 muestra los histogramas de la diferencia entre la PCM y la profundidad del máximo sub-superficial de fluorescencia (MSSF) para la campaña GEF 1 (a), GEF 3 (b) y ambas en forma conjunta (c), de modo de contar con más datos y repartidos entre primavera (octubre) y verano (marzo).



**Figura 3.19: Histogramas de la diferencia entre la PCM y la profundidad del máximo sub-superficial de fluorescencia para GEF 1 (a), GEF 3 (b) ambas campañas juntas (c). En todos los casos se muestra la cantidad de datos (observaciones) utilizados, el valor medio y el desvío estándar de la variable.**

La diferencia realizada es siempre PCM-MSSF, es decir, cuando las diferencias son positivas la PCM es mayor y el MSSF queda inmerso en la capa de mezcla. Por el contrario, las diferencias negativas indican un MSSF por debajo de la base de la capa de mezcla. Para diferencias centradas entre -10 m y 30 m, los histogramas de GEF 1 (octubre) y GEF 3 (marzo) muestran un 70 % y un 60 % de casos respectivamente. La cantidad de datos no es la misma, hay más datos en el caso de GEF 1 (Figura 3.19a y b). Si se analizan todos los datos juntos (Figura 3.19c) el número de casos totales aumenta y se puede confirmar resultados similares que sugieren que el MSSF se encuentra con mayor frecuencia (>65 %) cercano a la base de la capa de mezcla con una media aproximada de 16 m, en ocasiones dentro de la capa de mezcla y en otras por debajo de ella.

Garcia et al. (2011<sup>[21]</sup>) encontraron que para que existan floraciones de cocolitoforidos<sup>[1]</sup> la PCM debía ser menor que 30 m, y encontraron algunos casos donde los máximos de clorofila

<sup>[1]</sup>organismos fitoplanctónicos con caparazones de carbonato de calcio que proliferan con mayor intensidad en el verano

y fluorescencia se ubicaban por encima de la PCM (alrededor de 10 m) (ver Figura 15 de Garcia et al., 2011 [21]), lo cual parece ser consistente con lo obtenido ya que las mayores frecuencias y la media se encuentra en ese rango. Lutz et al. (2009 [37]) presentan gráficos correspondientes a dos estaciones (ver Figura 6 de Lutz et al., 2009 [37]) donde se muestra el perfil vertical de  $\sigma_\theta$ , fluorescencia y fluorescencia corregida con clorofila *in situ* y puede observarse en ellos que la PCM se encuentra más profunda que la posición del máximo sub-superficial de fluorescencia con una diferencia del orden de los 10 m.

Sabatini et al. (2012 [56]) mostraron en su análisis de estaciones estratificadas y mezcladas, que la estación 73 (GEF 1, octubre) presentó un perfil no homogéneo con mayor contribución de la temperatura (una débil estratificación dada por el parámetro de Simpson aproximadamente de  $18 \text{ J.m}^{-3}$ ) En los resultados del presente trabajo, esta estación se destaca del resto que la rodean por ser la única con perfil no homogéneo.

Carreto et al. (2016 [14]) en su análisis de secciones que cruzan el talud continental (GEF 1) encontraron que la región más austral mostró un *bloom* que se desarrolló con una estratificación muy débil casi incipiente, irradiancia solar creciente y altas concentraciones de nitratos y fosfatos. Observaron alta proporción de clorofila debajo de una capa mezcla de poco espesor. Esta floración de diatomeas pudo alcanzar el fondo, favoreciendo el desarrollo de comunidades epibentónicas y la formación de sedimentos ricos en hierro, que luego se disponibilizan a través de la surgencia en el talud.

El rol de la PCM aún no está claramente determinado ya que existen *blooms* con fuerte estratificación y capa de mezcla bien desarrollada y, a su vez, también existen con débil estratificación e incipiente capa de mezcla. Sin embargo, deben realizarse mayores esfuerzos y mediciones continuas en la época del inicio de la estratificación primaveral y del *bloom* de fitoplancton tanto en el talud como en sitios preferenciales de la plataforma argentina para aumentar nuestro conocimiento sobre la dinámica del fitoplancton, la base sobre la que se apoyan los ecosistemas altamente productivos de la plataforma Argentina.

# Capítulo 4

## Conclusiones

- Se pudo establecer una metodología que permitió evaluar diferentes métodos existentes en la bibliografía para estimar la PCM.
- Mediante una inspección visual de los perfiles verticales de densidad potencial, temperatura y salinidad de las campañas GEF se concluyó que era necesario identificar aquellos perfiles que se encuentran mezclados, desde la superficie al fondo, ya que no poseen una PCM estacional por ser completamente homogéneos. De esta manera se estableció un criterio, basado en la densidad potencial, para identificar esta clase de perfiles. Para el caso de las campañas GEF se encontró que el 45 % de los perfiles totales tienen capa de mezcla.
- Al realizar un ajuste de los valores de umbral para el área de estudio, se encontró que el rango para valores de umbral de  $0 - 0,2 \text{kg/m}^3$  presentaba valores adecuados para estimar la PCM independientemente de la profundidad de referencia elegida.
- Al realizar una calibración y validación de los umbrales elegidos se encontró como criterio único para estimar a la PCM a aquel que utiliza un umbral  $\Delta\sigma_\theta = 0,07 \text{kg/m}^3$  a una  $Z_{ref} = 10m$ .
- En invierno, se encontró un bajo porcentaje de perfiles con capa de mezcla cerca de la isobata de 200 m, al norte de los 40°S. En otoño, la mayor parte de los perfiles sin capa de mezcla se encontraron sobre la plataforma centro-sur y cerca de la costa. En verano se encontró que prácticamente todos los perfiles son no homogéneos, es decir, con presencia de capa de mezcla. Sólo se encontraron perfiles homogéneos (mezclados de superficie a fondo) cerca de la costa y sobre el Banco Burwood (coincidentes con trabajos que utilizan el parámetro de Simpson como indicador). Estos resultados son coherentes con lo esperado para esas estaciones del año.
- Se obtuvieron mapas de PCM estacionales utilizando el set de datos históricos y el criterio único. En la plataforma media y sur, pueden observarse valores más profundos en el invierno (aprox. de 100 m), y valores menos profundos a medida que avanza el calentamiento. Durante el verano se encontró que casi todos los perfiles no homogéneos de la región de estudio poseen una PCM casi constante en su distribución espacial en la plataforma con un valor promedio de 30 m, mientras que para el resto del año se destacó una diferencia en la columna de agua entre la región norte y sur del área de

estudio (aprox. en 47°S). Esto pudo ser una consecuencia de las diferencias térmicas observadas entre el norte y el sur en trabajos anteriores.

- Al realizar la comparación con el trabajo de Blanc et al. (1983  ) se encontraron semejanzas para la PCM pero no así para la SST ya que se encontraron diferencias del orden de 2°C más frías para el presente trabajo. Esto puede deberse a que estos autores utilizan datos de batítermógrafos (en esta tesis se utilizan mayormente datos de CTD), poseen mayor cantidad de datos y el área comparada no es exactamente la misma. No se halló un patrón característico para la relación entre la SST y la PCM.
- Como aplicación, se testeó para primavera y verano la relación entre la PCM y la profundidad del máximo sub-superficial de fluorescencia (MSSF), indicativo de la presencia de alta concentración de clorofila *in situ* en la vertical. Se encontró en ambas estaciones del año que más del 60 % de los casos presenta diferencias entre -10 y 30 m. La frecuencia de valores positivos es mayor por lo que, en la mayoría de los casos en los que el MSSF es cercano a la PCM, el máximo queda inmerso dentro de la capa mezclada. Aunque está clara la existencia de blooms por debajo de la PCM, se encontró que es menos frecuente la existencia del MSSF por debajo de éste. Para evaluar la relación PCM y MSSF es necesario el uso de boyas derivantes dentro de la plataforma (con sensores de fluorescencia, además de los tradicionales de conductividad y temperatura).

# Capítulo 5

## Apéndice

### 5.1. Metodología

#### 5.1.1. Criterio desarrollado por Lorbacher et al. (2006) para estimar la PCM a escala global

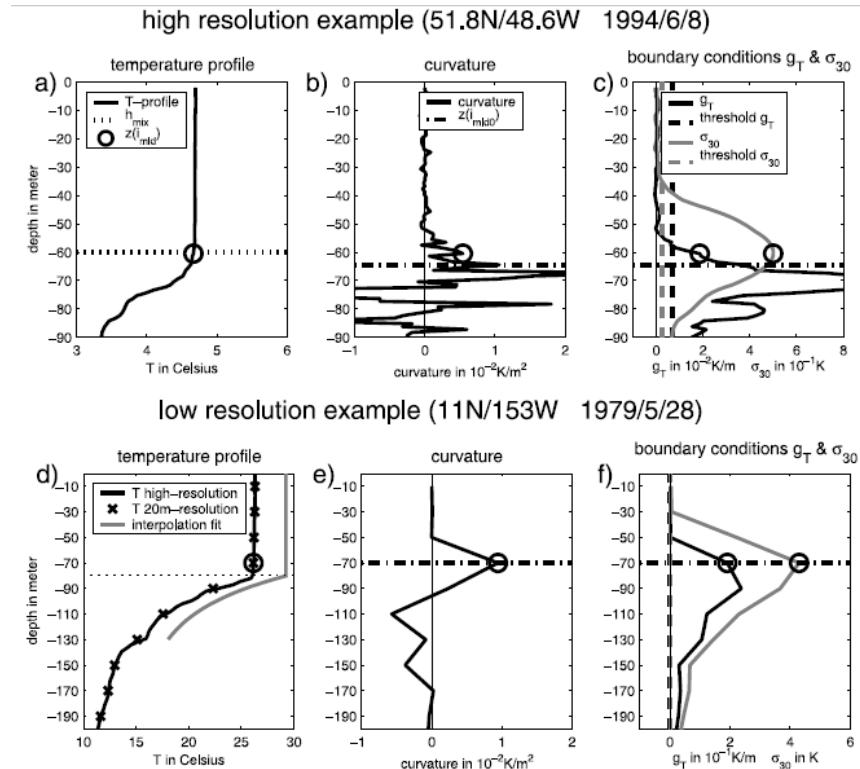
Este criterio fue desarrollado por Lorbacher et al. (2006 <sup>[35]</sup>) con el objetivo de estimar la PCM basándose en la curvatura de los perfiles de temperatura, salinidad y densidad potencial a través de un método que no dependa críticamente de la elección de valores de ciertos parámetros (umbral y  $Z_{ref}$ ). Por lo tanto, se considera la información contenida en la segunda derivada o “curvatura” del perfil ya que el extremo local de la curvatura del perfil es una característica distintiva de la profundidad a la cual eventos de mezcla recientes penetraron. Una ventaja de este enfoque es que, a diferencia de los criterios que utilizan umbrales, la estimación de la PCM no es una función lineal de otras cantidades dinámicas, como la SST, y es menos dependiente de la región y la época del año. La metodología explicada abajo utiliza al perfil vertical de temperatura, pero la misma puede aplicarse a la salinidad y a la densidad potencial.

Para llevar a cabo la estimación de la PCM utilizando el enfoque propuesto, se requiere dar un intervalo (en profundidad) donde la PCM puede encontrarse. Por lo tanto, se requiere la elección de dos parámetros para utilizarlos como condiciones de borde. Se define a la profundidad con valores negativos  $z(i)$  y a  $i=1$  como el nivel más cercano a la superficie. Posteriormente, se elige a los gradientes verticales como la primer condición de borde. Los gradientes de los perfiles verticales en el nivel  $i$  se definen según la ecuación [5.1], donde el índice  $i_{5m}$  es el siguiente nivel más profundo que está, al menos, 5 m más profundo que el nivel  $i$  para una estimación más estable de  $g_t(i)$ . Además, se define a la curvatura del perfil según la ecuación [5.2] (Figura [5.1] c y f).

$$(5.1) \quad g_t(i) = \frac{T(i) - T(i_{5m})}{z(i) - z(i_{5m})}$$

$$(5.2) \quad c_T(i) = \frac{g_t(i) - g_t(i-1)}{z(i-1) - z(i)}$$

Como segunda condición de borde para estimar el nivel más próximo a la PCM ( $h_{mix}$ ) se evalúa la variabilidad del perfil en los 30 m por debajo del nivel actual con el fin de distinguir la región homogénea más próxima a la región de rápido cambio. Se define a  $\sigma_{30}(i)$  como el desvío estándar de la temperatura (T) en intervalos de 30 m sobre el nivel actual (Figura 5.1 c y f).



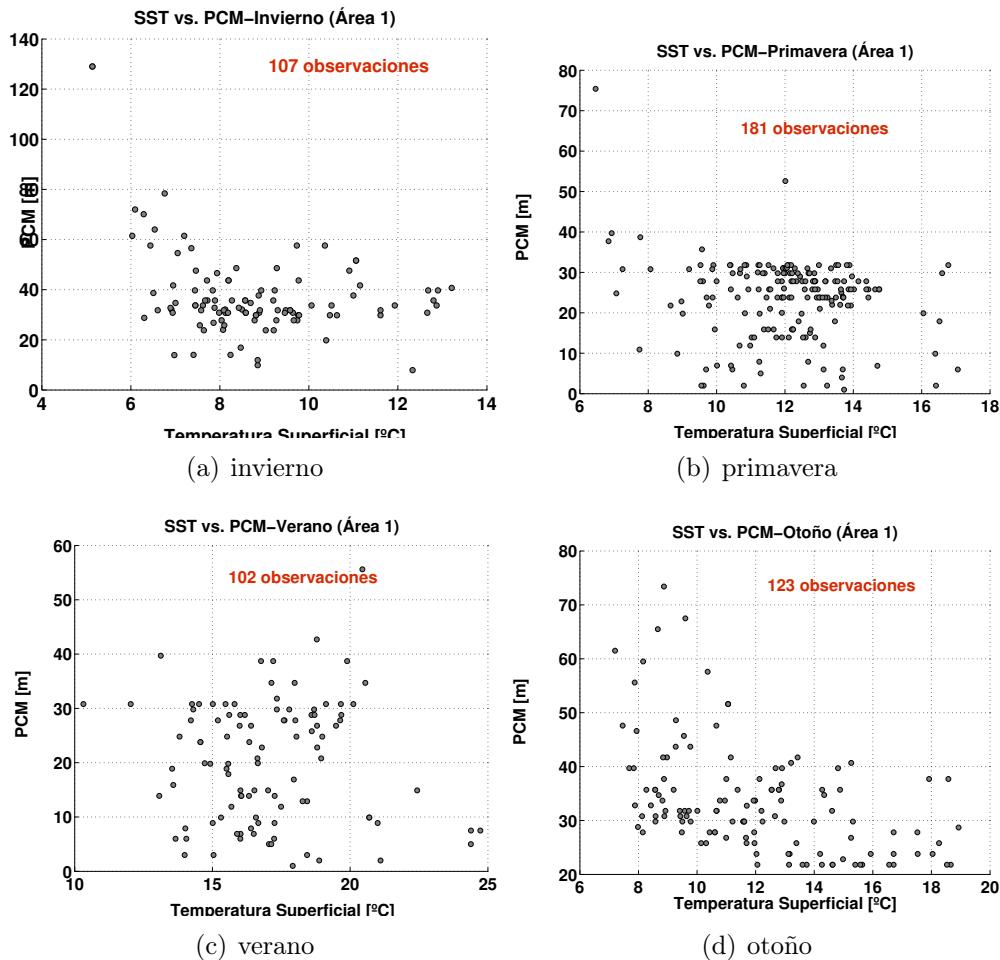
**Figura 5.1:** Perfil de temperatura con resolución vertical alta (a-c) y baja (d-f) considerado como ejemplo para estimar la  $h_{mix}$ . Los círculos con contornos negros muestran el nivel más próximo a  $h_{mix}$ . En línea sólida gris se muestra la interpolación. Extraido de Lorbacher et al. (2006 [35]).

Si el  $\max(\sigma_{30}) < 0.02$  K se determina como  $h_{mix} = \min(z)$ . Si no hay una región de significante inhomogeneidad en el perfil, entonces  $h_{mix}$  debe ser el nivel más bajo medido.

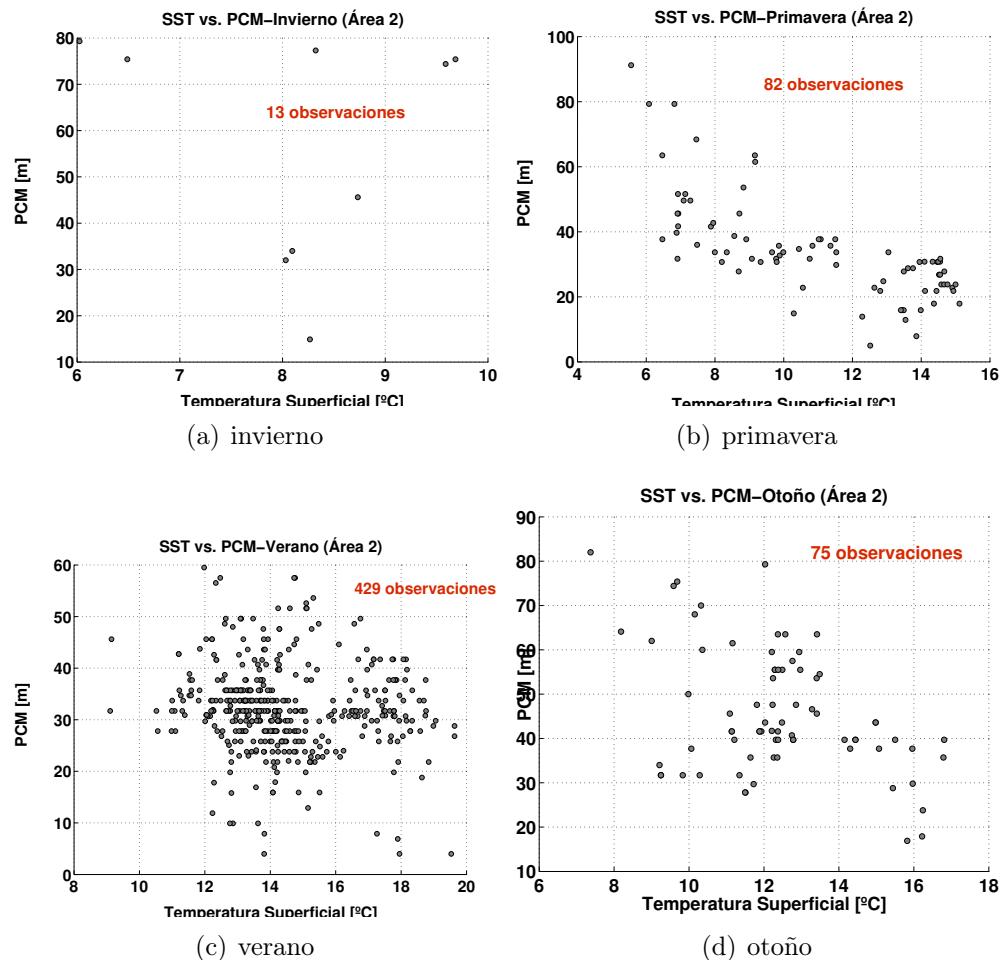
Utilizando ambas condiciones de borde y estableciendo ciertos valores límites para dichos parámetros pueden definir niveles próximos a la PCM, y por ende, a la termoclina. Luego de ello, establecen ciertas metodologías de interpolación para los perfiles de alta y baja resolución para encontrar una mejor estimación de la PCM. Una descripción más detallada del procedimiento puede encontrarse en su trabajo (Lorbacher et al., 2006 [35]).

### 5.1.2. Relación entre la SST y la MLD

Las Figuras 5.2 y 5.3 muestran gráficos entre la SST y la PCM para el Área 1 y el Área 2 respectivamente para cada estación. No se pudo obtener un patrón característico entre ambas variables. Blanc et al. (1983 [8]) en su trabajo tampoco pudo obtener una relación entre ambas variables que le permitiera usar a la SST como proxy para estimar la PCM.



**Figura 5.2:** Relación entre la SST [ $^{\circ}\text{C}$ ] y la PCM [m] para el Área 1. Se indican la cantidad de observaciones con las que se cuenta para invierno (a), primavera (b), verano (c) y otoño (d).



**Figura 5.3:** Relación entre la SST [ $^{\circ}\text{C}$ ] y la PCM [m] para el Área 2. Se indican la cantidad de observaciones con las que se cuenta para invierno (a), primavera (b), verano (c) y otoño (d).

# Bibliografía

- [1] ACHA, E. M., MIANZAN, H. W., GUERRERO, R. A., FAVERO, M., AND BAVA, J. Marine fronts at the continental shelves of austral south america: physical and ecological processes. *Journal of Marine systems* 44, 1 (2004), 83–105.
- [2] ÁLVAREZ, E., ZANELLA, J., PESCIO, A., AND DRAGANI, W. An estimation of the effect of a possible wind speed increase on the ocean mixed layer depth at the northern patagonian continental shelf. *Regional Studies in Marine Science* 6 (2016), 87–95.
- [3] BALDONI, A., KRUK, M., MOLINARI, G., AND ARIAS, R. Controles de Calidad. Informe de Investigación INIDEP N°14. Tech. rep., Base Regional de Datos Oceanográficos (BaRDO), INIDEP, 2008b.
- [4] BALDONI, A., MOLINARI, G., AND GUERRERO, R. Procesamiento y calibración de datos CTD. Informe de Investigación INIDEP N°52. Tech. rep., Base Regional de Datos Oceanográficos (BaRDO), INIDEP, 2008c.
- [5] BALDONI, A., MOLINARI, G., GUERRERO, R., AND KRUK, M. Informe de Investigación INIDEP N°13. Tech. rep., Base Regional de Datos Oceanográficos (BaRDO), INIDEP, 2008a.
- [6] BIANCHI, A. A., BIANUCCI, L., PIOLA, A. R., PINO, D. R., SCHLOSS, I., POISSON, A., AND BALESTRINI, C. F. Vertical stratification and air-sea co<sub>2</sub> fluxes in the patagonian shelf. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 110, C7 (2005).
- [7] BIANCHI, A. A., PINO, D. R., PERLENDER, H. G. I., OSIROFF, A. P., SEGURA, V., LUTZ, V., CLARA, M. L., BALESTRINI, C. F., AND PIOLA, A. R. Annual balance and seasonal variability of sea-air co<sub>2</sub> fluxes in the patagonia sea: Their relationship with fronts and chlorophyll distribution. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 114, C3 (2009).
- [8] BLANC, S., GOÑI, G., AND NOVARINI, J. Surface mixed layer temperature and layer depth in water off the argentinian coast. *Journal of geophysical research* 88, C10 (1983), 5987–5996.
- [9] BOSS, E., SWIFT, D., TAYLOR, L., BRICKLEY, P., ZANEVELD, R., RISER, S., PERRY, M., AND STRUTTON, P. Observations of pigment and particle distributions in the western north atlantic from an autonomous float and ocean color satellite. *Limnology and Oceanography* 53, 5 (2008), 2112.

- [10] BOYER, T., ANTONOV, J., BARANOVA, O., COLEMAN, C., GARCIA, H., GRODSKY, A., JOHNSON, D., LOCARNINI, R., MISHONOV, A., O'BRIEN, T., ET AL. World ocean database 2013, noaa atlas nesdis 72. *National Oceanographic Data Center Ocean Climate Laboratory, Silver Spring, MD* (2013).
- [11] BRAINERD, K. E., AND GREGG, M. C. Surface mixed and mixing layer depths. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 42, 9 (1995), 1521–1543.
- [12] BRANDHORST, W., AND CASTELLO, J. Proyecto desarollo pesquera. *Ser. Int. Tec., pub*, 29 (1971).
- [13] CARRANZA, M. M., AND GILLE, S. T. Southern ocean wind-driven entrainment enhances satellite chlorophyll-a through the summer. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 120, 1 (2015), 304–323.
- [14] CARRETO, J. I., MONTOYA, N. G., CARIGNAN, M. O., AKSELMAN, R., ACHA, E. M., AND DERISIO, C. Environmental and biological factors controlling the spring phytoplankton bloom at the patagonian shelf-break front-degraded fucoxanthin pigments and the importance of microzooplankton grazing. *Progress in Oceanography* 146 (2016), 1–21.
- [15] CHARO, M., AND PIOLA, A. Hydrographic data from the gef patagonia cruises. *Earth System Science Data* 6, 1 (2014), 265–271.
- [16] CRONIN, M. Upper ocean vertical structure. *Elements of Physical Oceanography: A derivative of the Encyclopedia of Ocean Sciences* (2009), 229.
- [17] DE BOYER MONTÉGUT, C., MADEC, G., FISCHER, A. S., LAZAR, A., AND IUDICONE, D. Mixed layer depth over the global ocean: An examination of profile data and a profile-based climatology. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 109, C12 (2004).
- [18] DÓRTENZIO, F., IUDICONE, D., DE BOYER MONTEGUT, C., TESTOR, P., ANTOINE, D., MARULLO, S., SANTOLERI, R., AND MADEC, G. Seasonal variability of the mixed layer depth in the mediterranean sea as derived from in situ profiles. *Geophysical Research Letters* 32, 12 (2005).
- [19] FALABELLA, V., CAMPAGNA, C., AND CROXALL, J. *Atlas del Mar Patagónico: especies y espacios*. Wildlife Conservation Society, 2009.
- [20] FASHAM, M. Variations in the seasonal cycle of biological production in subarctic oceans: A model sensitivity analysis. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 42, 7 (1995), 1111–1149.
- [21] GARCIA, C. A. E., GARCIA, V. M. T., DOGLIOTTI, A. I., FERREIRA, A., ROMERO, S. I., MANNINO, A., SOUZA, M. S., AND MATA, M. M. Environmental conditions and bio-optical signature of a coccolithophorid bloom in the patagonian shelf. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 116, C3 (2011).

- [22] GARREAUD, R. D., VUILLE, M., COMPAGNUCCI, R., AND MARENGO, J. Present-day south american climate. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 281, 3 (2009), 180–195.
- [23] GARZOLI, S. L., AND GARRAFFO, Z. Transports, frontal motions and eddies at the brazil-malvinas currents confluence. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers* 36, 5 (1989), 681–703.
- [24] GILLE, S. T., CARRANZA, M. M., CAMBRA, R., AND MORROW, R. Wind-induced upwelling in the kerguelen plateau region. *Biogeosciences* 11, 22 (2014), 6389–6400.
- [25] GODFREY, J., AND LINDSTROM, E. The heat budget of the equatorial western pacific surface mixed layer. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 94, C6 (1989), 8007–8017.
- [26] GORDON, A. L., AND GREENGROVE, C. L. Geostrophic circulation of the brazil-falkland confluence. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers* 33, 5 (1986), 573–585.
- [27] INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO PESQUERO: GABINETE DE OCEANOGRAFÍA FÍSICA. *Base Regional de Datos Oceanográficos BaRDO*. Ministerio de Agricultura Ganadería y Pesca, Subsecretaría de Pesca y Acuicultura de la Nación. Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo Pesquero. Paseo Victoria Ocampo Nº1, Mar del Plata, Bs. As. Argentina.
- [28] KAHL, L. C. Balance y variabilidad del co2 en el mar patagónico. Master's thesis, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, UBA, 2013.
- [29] KARA, A. B., ROCHFORD, P. A., AND HURLBURT, H. E. Mixed layer depth variability and barrier layer formation over the north pacific ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 105, C7 (2000), 16783–16801.
- [30] KARA, A. B., ROCHFORD, P. A., AND HURLBURT, H. E. An optimal definition for ocean mixed layer depth. Tech. rep., DTIC Document, 2000.
- [31] KARA, A. B., ROCHFORD, P. A., AND HURLBURT, H. E. Mixed layer depth variability over the global ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 108, C3 (2003).
- [32] KREPPER, C. M., AND BIANCHI, A. Balance calórico del mar epicontinental argentino. *Acta Oceanographica Argentina* 3, 1 (1982).
- [33] LEVITUS, S. Climatological atlas of the world ocean. *NOAA Prof. Pap.* 13 (1982).
- [34] LONGHURST, A. R. *Ecological geography of the sea*. San Diego, CA, USA, Academic Press, 1998.
- [35] LORBACHER, K., DOMMENGET, D., NIILER, P., AND KÖHL, A. Ocean mixed layer depth: A subsurface proxy of ocean-atmosphere variability. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 111, C7 (2006).

- [36] LUTZ, V. A., AND CARRETO, J. A new spectrofluorometric method for the determination of chlorophylls and degradation products and its application in two frontal areas of the argentine sea. *Continental Shelf Research* 11, 5 (1991), 433–451.
- [37] LUTZ, V. A., SEGURA, V., DOGLIOTTI, A. I., GAGLIARDINI, D. A., BIANCHI, A. A., AND BALESTRINI, C. F. Primary production in the argentine sea during spring estimated by field and satellite models. *Journal of Plankton Research* (2009), fbp117.
- [38] MANN, K. H., AND LAZIER, J. R. *Dynamics of marine ecosystems: biological-physical interactions in the oceans*. Cambridge, USA, Blackwell Science Publications, 2006.
- [39] MARSHALL, G. J. Trends in the southern annular mode from observations and reanalyses. *Journal of Climate* 16, 24 (2003), 4134–4143.
- [40] MARTINEZ AVELLANEDA, N. Ciclo anual y variabilidad de baja frecuencia de la temperatura superficial del mar en el océano atlántico sudoeste. Master's thesis, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, UBA, 2005.
- [41] MATANO, R., PALMA, E., AND PIOLA, A. The influence of the brazil and malvinas currents on the southwestern atlantic shelf circulation. *Ocean Science* 6, 4 (2010), 983–995.
- [42] MIGNOT, A., CLAUSTRE, H., DÓRTENZIO, F., XING, X., POTEAU, A., AND RAS, J. From the shape of the vertical profile of in vivo fluorescence to chlorophyll-a concentration. *Biogeosciences* 8, 8 (2011), 2391–2406.
- [43] MONTEREY, G., AND LEVITUS, S. Seasonal variability of mixed layer depth for the world ocean. *NOAA Atlas NESDIS14, US Gov. Printing Office, Wash., DC* (1997).
- [44] OLSON, D. B., AND BACKUS, R. H. The concentrating of organisms at fronts: a cold-water fish and a warm-core gulf stream ring. *Journal of Marine Research* 43, 1 (1985), 113–137.
- [45] PALMA, E. D., MATANO, R. P., AND PIOLA, A. R. A numerical study of the southwestern atlantic shelf circulation: Stratified ocean response to local and offshore forcing. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 113, C11 (2008).
- [46] PIOLA, A. Campaña Oceanográfica GEF Patagonia 1. Tech. rep., Servicio de Hidrografía Naval, SHN, 2005.
- [47] PIOLA, A., AND MATANO, R. Brazil and falklands (malvinas) currents. *Ocean Currents: a Derivative of the Encyclopedia of Ocean Sciences* (2001), 35–43.
- [48] PIOLA, A. R., AND RIVAS, A. Corrientes en la plataforma continental. *Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo Pesquero (INIDEP): Mar del Plata* (1997).
- [49] PODESTÁ, G. P., BROWN, O. B., AND EVANS, R. H. The annual cycle of satellite-derived sea surface temperature in the southwestern atlantic ocean. *Journal of Climate* 4, 4 (1991), 457–467.

- [50] PRICE, J. F., WELLER, R. A., AND PINKEL, R. Diurnal cycling: Observations and models of the upper ocean response to diurnal heating, cooling, and wind mixing. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 91, C7 (1986), 8411–8427.
- [51] RISARO, D. B. Estudio de tendencias de la temperatura superficial del mar en la plataforma patagónica. Master's thesis, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, UBA, 2015.
- [52] RIVAS, A. L. Spatial variation of the annual cycle of temperature in the patagonian shelf between 40 and 50° of south latitude. *Continental Shelf Research* 14, 13 (1994), 1539–1554.
- [53] RIVAS, A. L. Spatial and temporal variability of satellite-derived sea surface temperature in the southwestern atlantic ocean. *Continental Shelf Research* 30, 7 (2010), 752–760.
- [54] ROMERO, S. I. Estimaciones satelitales de clorofila y los frentes océánicos del atlántico sudoccidental. Master's thesis, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, UBA, 2008.
- [55] ROMERO, S. I., PIOLA, A. R., CHARO, M., AND GARCIA, C. A. E. Chlorophyll-a variability off patagonia based on seawifs data. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 111, C5 (2006).
- [56] SABATINI, M., AKSELMAN, R., RETA, R., NEGRI, R., LUTZ, V., SILVA, R., SEGURA, V., GIL, M., SANTINELLI, N., SASTRE, A., ET AL. Spring plankton communities in the southern patagonian shelf: Hydrography, mesozooplankton patterns and trophic relationships. *Journal of Marine Systems* 94 (2012), 33–51.
- [57] SARACENO, M., AND PROVOST, C. On eddy polarity distribution in the southwestern atlantic. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 69 (2012), 62–69.
- [58] SCHNEIDER, N., AND MÜLLER, P. The meridional and seasonal structures of the mixed-layer depth and its diurnal amplitude observed during the hawaii-to-tahiti shuttle experiment. *Journal of physical oceanography* 20, 9 (1990), 1395–1404.
- [59] SEA-BIRD ELECTRONICS INC. *Entering Calibration Coefficients for the Seapoint Fluorometer*, application note no. 54 ed. Bellevue, Washington, USA, February 2010.
- [60] SEGURA, V., LUTZ, V. A., DOGLIOTTI, A., SILVA, R. I., NEGRI, R. M., AKSELMAN, R., AND BENAVIDES, H. Phytoplankton types and primary production in the argentine sea. *Marine Ecology Progress Series* 491 (2013), 15–31.
- [61] SHAY, T. J., AND GREGG, M. Convectively driven turbulent mixing in the upper ocean. *Journal of Physical Oceanography* 16, 11 (1986), 1777–1798.
- [62] SPARROW, M. D., CHAPMAN, P., AND GOULD, W. J. *Hydrographic Atlas of the World Ocean Circulation Experiment (WOCE): Southern Ocean*. WOCE International Project Office, 2005.

- [63] SPRINTALL, J., AND ROEMMICH, D. Characterizing the structure of the surface layer in the pacific ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 104, C10 (1999), 23297–23311.
- [64] SUGA, T., MOTOKI, K., AOKI, Y., AND MACDONALD, A. M. The north pacific climatology of winter mixed layer and mode waters. *Journal of Physical Oceanography* 34, 1 (2004), 3–22.
- [65] SUTHERLAND, G., REVERDIN, G., MARIÉ, L., AND WARD, B. Mixed and mixing layer depths in the ocean surface boundary layer under conditions of diurnal stratification. *Geophysical Research Letters* 41, 23 (2014), 8469–8476.
- [66] TALLEY, L. D., PICKARD, G. L., EMERY, W. J., AND SWIFT, J. H. *Descriptive Physical Oceanography: An Introduction*, sixth ed. Elsevier, Boston, 2011.
- [67] THOMSON, R. E., AND FINE, I. V. Estimating mixed layer depth from oceanic profile data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 20, 2 (2003), 319–329.
- [68] WELLER, R. A., AND PLUEDDEMANN, A. J. Observations of the vertical structure of the oceanic boundary layer. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 101, C4 (1996), 8789–8806.
- [69] WOODS, J. D., AND BARKMANN, W. The response of the upper ocean to solar heating. i: The mixed layer. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 112, 471 (1986), 1–27.
- [70] XING, X., MOREL, A., CLAUSTRE, H., ANTOINE, D., DÓRTENZIO, F., POTEAU, A., AND MIGNOT, A. Combined processing and mutual interpretation of radiometry and fluorimetry from autonomous profiling bio-argo floats: Chlorophyll a retrieval. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 116, C6 (2011).